

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

SECCIÓN DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL



**“IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS CUASIELÁSTICOS DE
CORRIENTE CARGADA (QEL-CC) EN EL DETECTOR
DE NEUTRINOS DEL EXPERIMENTO MINERvA”**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA

ELABORADO POR

ADOLFO VICENTE CHAMORRO GÓMEZ

Asesor

Dr. CARLOS JAVIER SOLANO SALINAS

LIMA – PERÚ

2013

Gracias a todos los que hicieron posible
esta tesis.

Índice general

1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
2.1. El Modelo Estándar	3
2.2. Dispersión neutrino-nucleón	7
2.2.1. Reacción cuasielástica corriente cargada	7
2.2.2. Reacción elástica - corriente neutra	9
2.2.3. Dispersión profundamente inelástica - corriente cargada	9
2.2.4. Dispersión profundamente inelástica - corriente neutra	10
3. El Experimento MINERνA	12
3.1. MINOS y el Hall NuMI	12
3.2. El haz NuMI o NuMI Beam	13
3.3. Objetivos del experimento MINER ν A	14
3.4. El detector del Experimento MINER ν A	17
3.4.1. Vista general del detector	17
3.4.2. Planos de Centelleo	20
3.4.3. Sistema óptico MINER ν A	22
3.4.4. Calorímetros y Blancos	24

4. Desarrollo del MINERνA Mapper Mover	28
4.1. Mapeo de los módulos del detector MINER ν A	28
4.2. Software para el control del movimiento de las fuentes	30
4.3. Simulación del escaneo	31
4.4. Optimización del camino del mapper	32
5. Empaquetamiento y distribución del Software MINERνA	35
5.1. Vista general del Software MINER ν A	35
5.2. Empaquetamiento del Software MINER ν A	36
5.2.1. Requerimientos del sistema	37
5.2.2. Instrucciones de instalación	37
5.2.3. Que está en el CD	38
5.2.4. Estructura de los archivos de instalación	38
5.3. Configuración y uso del software MINER ν A	40
5.3.1. Variables de entorno	40
5.3.2. Principales aplicaciones MINER ν A	41
5.3.3. Uso de las aplicaciones MINER ν A	41
5.4. Problemas resueltos utilizando el CD:	52
6. Análisis topológico de eventos QEL-CC	54
6.1. Simulación de eventos QEL-CC	54
6.1.1. Generación de eventos QEL-CC usando GENIE	55
6.2. Simulación usando Mega (GEANT4) del paso de las partículas del estado final GENIE a través del detector MINER ν A	59
7. Identificación de eventos reales QEL-CC	60
7.1. Análisis de eventos simulados QEL-CC	60

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
7.2. Filtrado de Eventos reales QEL-CC	64
7.3. Identificación de partículas	65
8. Conclusiones	71
A. Scripts	73
A.1. Scripts de instalación:	73
A.1.1. install.sh	73
A.1.2. installLHCb.sh	74
A.1.3. installMinerva.sh	75
A.2. Scripts usados en la configuración de las simulaciones:	77
A.2.1. Archivo de órdenes del generador de eventos de neutrinos GENIE	77
A.2.2. Archivo de órdenes MEGA, detector de neutrinos MINER ν A . .	78
A.3. Scripts usados para el análisis de los resultados	81
A.3.1. Calcula y gráfica en un histograma el número de trayectorias por vértice	81
A.3.2. Programa para determinar la suma de los ángulos azimutales . .	82
A.3.3. Script para filtrar eventos reales QEL-CC	82
A.3.4. Scripts para la identificación de partículas	85
Bibliografía	92

Índice de figuras

2.1. Familias de partículas	6
3.1. Localización del detector MINER ν A en el laboratorio FERMILAB . . .	13
3.2. El haz NuMI se obtiene al producir un haz de piones que se desintegran según la reacción: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	14
3.3. Distribución de energía de los neutrinos para las tres configuraciones estándar del NuMI Beam	15
3.4. Sección eficaz total para la dispersión del ν_μ	16
3.5. Izquierda: Vista lateral esquemática del detector de MINER ν A. Derecha: Vista isométrica del detector mostrando el Veto Wall y parte del soporte.	18
3.6. Dimensiones de la sección triangular de la tiras utilizadas para la con- strucción de los planos de centelleo	21
3.7. Vista frontal del detector MINER ν A para ilustrar forma y escala	21
3.8. Planos	22
3.9. Sistema óptico del experimento MINER ν A	22
3.10. Blancos Nucleares	27
4.1. Esquema del módulo mapper	29
4.2. Simulador del módulo mapper	30

4.3. Fotografías que muestran las posiciones del mapper mover y del módulo mapper en el hall MINER ν A	34
5.1. Estructura de los principales archivos de instalación	40
5.2. Sesión Vista: mostrará el detector y los eventos	45
5.3. Sesión Vista: muestra el detector	46
5.4. Sesión Vista: muestra el detector y el evento	47
5.5. Sesiones Vista	47
5.6. Histograma del Número de Hits en el detector interno. 1k de piones de 1GeV. El evento se produce en la coordenada (0,0) del detector.	50
5.7. Histograma de comparación del Número de Hits en el detector interno para 1k de eventos de electrones (rojo), muones (negro) y piones (verde).	51
5.8. Histograma de la Energía Perdida por modulo del detector para 1k de eventos de electrones (rojo), muones (negro) y piones (verde).	51
5.9. Histograma de la Energía Total depositada para 1 K de eventos de electrones (rojo), muones (negro) y piones (verde).	52
6.1. $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$	55
6.2. Histograma de las energías disponibles para la simulación de las interacciones y posición de las interacciones primarias en el detector MINER ν A	56
6.3. Patrones de un evento cuasielástico en el detector MINER ν A	59
7.1. Histograma del número de tracks asociados con un vértice	61
7.2. Histograma de la suma de ángulos azimutales	63
7.3. Display de un evento filtrado QEL desde las vistas X, U, y V del detector MINER ν A	68
7.4. Trayectorias (tracks) de las 2 partículas producidas en el evento QEL-CC	68

7.5. PEs recolectados en cada nodo del detector debido al paso de las 2 partículas producidas en el evento QEL-CC	69
7.6. PEs recolectados en cada módulo (perfiles de pérdida de energía) para las 2 trayectorias del evento QEL-CC: el perfil rojo corresponde al protón, que ha sido frenado con mayor facilidad, y el perfil azul corresponde al muón, partícula más ligera	69
7.7. Perfiles dEdx para diferentes momentos	70
7.8. Discriminación de protón y pión	70

Resumen

El presente trabajo se realizó en el marco del desarrollo del experimento MINER ν A, que es un experimento de dispersión de neutrinos que se lleva a cabo en el laboratorio *FERMILAB* (Fermi National Accelerator Laboratory) de los Estados Unidos, con la colaboración internacional de 7 países, incluyendo a Perú, y 22 instituciones, entre las cuales figura la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (FC-UNI). En la tesis se ha trabajado en los siguientes aspectos del experimento: desarrollo y optimización del software utilizado para controlar el movimiento de las fuentes radiactivas empleadas para mapear los módulos del detector, desarrollo del software utilizado para simular el detector, simulación de eventos cuasielásticos de corriente cargada, e identificación de eventos reales mediante perfiles de pérdida de energía. Los resultados obtenidos han contribuido de manera directa en el progreso del experimento MINER ν A que tiene como objetivo general calcular con alta precisión la sección eficaz (probabilidad) de dispersión de la interacción neutrino-núcleo.

Capítulo 1

Introducción

La Física de neutrinos a sido uno de los tópicos mas excitantes de la Física de Partículas en los ultimos años. Ahora se conoce que los neutrinos tienen masa y que pueden cambiar de sabor (oscilar). Por lo que conocer con precisión la sección eficaz y el estado final del neutrino en la interacción neutrino-núcleo es esencial para los experimentos de oscilación de neutrinos.

MINER ν A (Main INjector ExpeRiment for ν -A) es un experimento de blanco fijo que ha sido diseñado precisamente para estudiar con detalle sin precedentes la interacción neutrino-núcleo a bajas energías. Este experimento se viene ejecutando en el laboratorio de física de altas energías *FERMILAB*, ubicado en Batavia, Illinois (Estados Unidos), y usa el haz de neutrinos NuMI que es producido a partir del acelerador de partículas de dicho laboratorio, llamado Tevatrón. Este acelerador es un sincrotrón que acelera protones y antiprotones en un anillo de 6.3 Km de circunferencia hasta energías de casi 1 TeV, de donde proviene su nombre.

La presente tesis esta compuesta de 8 capítulos, además contiene un Apéndice y la Bibliografía.

En el capítulo II se presenta de modo simplificado el Modelo Estandar de la Física de Partículas el cual se utiliza para describir las interacciones neutrino-núcleo (interacción

débil).

En el capítulo III se describe el experimento MINER ν A y sus objetivos de manera detallada.

En el capítulo IV se presenta el MINER ν A Mapper Mover, el software que se desarrollo para controlar el movimiento de las fuentes radiactivas utilizadas para el mapeo de los módulos de detector.

En el capítulo V se describe el software del experimento MINER ν A que ha sido diseñado para operar, simular, analizar, y visualizar los datos del experimento. En ese capítulo se presenta el trabajo realizado para conseguir el empaquetamiento y la distribución del software.

En el capítulo VI se presenta un análisis topológico de eventos cuasielásticos simulados con el software MINER ν A, desde la simulación de la generación de eventos cuasielásticos usando GENIE, hasta la simulación del paso de partículas através del detector usando GEANT4.

En el capítulo VII se presenta una metodología desarrollada para filtrar eventos cuasielásticos reales obtenidos en el detector MINER ν A a partir del análisis de datos de eventos simulados.

Finalmente, en el capítulo VIII se presentan las conclusiones de estos trabajos, las cuales han contribuido de manera directa, desde el diseño hasta el análisis, en el progreso del experimento MINER ν A que tiene como objetivo principal medir con alta precisión la sección eficaz (probabilidad) de dispersión de la interacción neutrino-núcleo. Además, se presenta en el Apéndice de la tesis todos los scripts que han sido elaborados para realizar las simulaciones y los análisis mencionados.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. El Modelo Estándar

El Modelo Estándar (ME) ([13], [14], [15]) de partículas elementales, es la teoría que describe las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas entre las partículas elementales (este modelo no incluye la interacción gravitacional).

Partículas elementales

Se entiende por partículas elementales a los constituyentes puntuales de la materia, es decir, sin subestructura conocida. Son de 2 tipos: partículas materiales y partículas intermedias o de interacción.

Las partículas materiales del ME son fermiones de espín $s = 1/2$ y se clasifican a su vez en leptones y quarks. Los leptones son: el electrón e , el muón μ , el tau τ , y sus correspondientes neutrinos ν_e, ν_μ, ν_τ .

Las principales características de los leptones dentro del ME se presentan en la tabla 2.1. Cada uno de los leptones cargados tiene además su antipartícula, por ejemplo, el electrón e^- tiene una antipartícula llamada positrón e^+ que posee la misma masa del electrón pero carga opuesta. Es decir en total se tiene 6 leptones cargados. En el

Lepton	Masa [MeV/c ²]	Vida media [s]	Carga
Electrón e^-	0.511	∞	-1
Neutrino electrónico ν_e	0	∞	0
Muón μ^-	105.658	2.197×10^{-6}	-1
Neutrino muónico ν_μ	0	∞	0
Tau τ^-	1777	291.0 ± 1.5	-1
Neutrino taónico ν_τ	0	∞	0

Tabla 2.1: Leptones en el ME

caso de los neutrinos, debido a que tienen carga eléctrica nula, surgen dos posibilidades para ellos: en principio podrían ser sus propias antipartículas (lo cual los constituye en fermiones de Majorana), o en caso contrario, cada neutrino puede tener una antipartícula distinta a ella misma (constituyéndolos en fermiones de Dirac).

Si bien los neutrinos en el ME carecen de masa, existe evidencia experimental reciente que confirma que esta, aunque pequeña, no es cero, lo cual enriquece la fenomenología de los mismos ya que implica la existencia de oscilaciones, ángulos de mezclas, violaciones de números cuánticos, etc. La detección de las masas de neutrinos constituye una de las primeras observaciones de física mas allá del ME.

Por otra parte, los quarks son seis y se los denomina: up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t) y bottom (b); se dice por tanto, que existen seis *sabores* de quarks, y a su vez, existen las correspondientes antipartículas de cada uno. Experimentalmente no ha sido posible encontrar quarks en estados aproximadamente *libres*, se supone que estas partículas se encuentran en estados ligados llamados hadrones y clasificados a su vez en mesones [estados ligados de quark-antiquark, $(\bar{q}q')$] y bariones [estados ligados de tres quarks, $(qq'q'')$]. Esta descripción de la estructura de los hadrones es consistente con los resultados de experimentos de dispersión profundamente inelástica, que muestran que los mesones tienen dos quarks de valencia y los bariones tres, pero debe hacerse la aclaración que los hadrones son estados muy complejos de interacciones entre quarks y

Quark	Masa [MeV/c ²]	Carga
<i>u</i>	2-8	2/3
<i>d</i>	5-13	-1/3
<i>c</i>	1000-1600	2/3
<i>s</i>	100-300	-1/3
<i>t</i>	168000-192000	2/3
<i>b</i>	4100-4500	-1/3

Tabla 2.2: Quarks en el ME

Interacción	Bosón	Espín	Carga eléctrica	Masa [MeV/c ²]
Debíl	W^-, W^+, Z	1	-1, +1, 0	80.4, 80.4, 91.188
Electromagnética	γ (fotón)	1	0	0
Fuerte	$G^a, a = 1, \dots, 8$ (gluones)	1	0	0

Tabla 2.3: Partículas mediadoras en el ME

partículas mediadoras. Las masas aproximadas de los quarks en el ME pueden verse en la tabla 2.2.

El segundo tipo de partículas son denominadas partículas mediadoras o de interacción y en general son bosones. Éstos en el ME son: el fotón γ , los bosones débiles W^-, W^+ y Z , mediadores de la interacción electrodébil (en el ME la interacción electromagnética y la débil están vinculadas entre sí), los ocho gluones $G^a, a = 1, \dots, 8$ mediadores de la interacción fuerte, y el bosón de Higgs Φ , que entra en el ME a raíz de la inclusión de un sector escalar que tiene como fin dotar de masa a las partículas. Cabe destacar que el sector escalar del ME no ha sido confirmado experimentalmente hasta el momento. Por otra parte, aunque el ME no incluye a la interacción gravitacional, también se presume de la existencia de su mediador, denominado gravitón, el cual tampoco a sido detectado. Las principales características de los mediadores en el ME están consignadas en la tabla 2.3.

Los leptones y los quarks en el ME se organizan en tres familias. Estas familias, en cuanto sus componentes tienen los mismos números cuanticos, pero se diferencia

Familia 1			Familia 2			Familia 3		
	Q (e)	M (MeV)		Q (e)	M (MeV)		Q (e)	M (MeV)
u	2/3	~ 310	c	2/3	1500	t	2/3	174300
d	-1/3	~ 310	s	-1/3	505	b	-1/3	4500
ν_e	0	~ 0	ν_μ	0	~ 0	ν_τ	0	~ 0
e	-1	0.5	μ	-1	106	τ	-1	1784

Figura 2.1: Familias de partículas

en su masa, que es creciente con el *número de familia*, con la posible excepción de los neutrinos. Ver figura 2.1.

Las Interacciones Fundamentales

Las partículas de las tres familias están sujetas a cuatro tipos de interacciones: gravitacional, fuerte, débil y electromagnética. El Modelo Estándar no describe la interacción gravitacional.

La interacción electromagnética se describe con mucha precisión con la electrodinámica cuántica (QED). Los mediadores de esta interacción son los fotones. Entre las partículas del ME únicamente los neutrinos son inmunes a la interacción electromagnética.

La interacción fuerte es la fuerza responsable de mantener unidos a los nucleones (protones y neutrones) que coexisten en el núcleo atómico, venciendo a la repulsión electromagnética entre los protones que poseen carga eléctrica del mismo signo (positiva) y haciendo que los neutrones, que no tienen carga eléctrica, permanezcan unidos entre sí y también a los protones. Los efectos de esta fuerza sólo se aprecian a distancias muy pequeñas, del tamaño de los núcleos atómicos, y no se perciben a distancias mayores a 1 fm. A esta característica se la conoce como de corto alcance, en contraposición con las de largo alcance como la gravedad o la interacción electromagnética, que son estrictamente de alcance infinito.

La interacción débil, frecuentemente llamada fuerza débil o fuerza nuclear débil, se

debe al intercambio de los bosones W y Z, que son muy masivos. El efecto más familiar es el decaimiento beta (de los neutrones en el núcleo atómico) y la radiactividad. La palabra *débil* deriva del hecho que su campo de fuerzas es de 10¹³ veces menor que la interacción nuclear fuerte; aun así esta interacción es más fuerte que la gravitación a cortas distancias.

2.2. Dispersión neutrino-nucleón

Las interacciones del neutrino son descritos, con una impresionante precisión, por el Modelo Estándar. Hasta el momento no se han encontrado desviaciones, con respecto al Modelo Estándar, en los datos experimentales de medidas de la interacción de neutrinos con la materia.

2.2.1. Reacción cuasielástica corriente cargada

Las interacciones cuasielásticas de corriente cargada de neutrinos y antineutrinos con nucleones son:

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \quad (2.1)$$

$$\bar{\nu}_l + p \rightarrow n + l^+ \quad (2.2)$$

con $l = e, \mu, \tau$. En la práctica, solo haces de neutrinos y antineutrinos del electrón y el muon están disponibles en el laboratorio. Haces del neutrino tau son generados en ambientes astrofísicos y por interacciones de rayos cósmicos de alta energía con la atmósfera de la Tierra.

Los procesos en la ecuación (2.2) con $l = e$, algunas veces son llamados *decaimiento inverso del neutrón*, han sido usados en el experimento histórico de Cowan y Reines [28] en el que los neutrinos fueron observados por primera vez. Tal proceso es actualmente

usado en detectores de antineutrinos electrónicos producidos en reactores (por ejemplo, CHOOZ [48], Palo Verde [49], KamLAND [50]).

La sección eficaz diferencial para los procesos de dispersión ν_l y $\bar{\nu}_l$ en las ecuaciones (2.1) y (2.2) en el laboratorio son dados por (ver Ref. [18])

$$\frac{d\sigma_{CC}^{\nu_l n, \bar{\nu}_l p}}{dQ^2} = \frac{G_F^2 |V_{ud}|^2 m_N^4}{8\pi (p_\nu \cdot p_{N_i})^2} \left[A(Q^2) \pm B(Q^2) \frac{s-u}{m_N^2} + C(Q^2) \frac{(s-u)^2}{m_N^4} \right] \quad (2.3)$$

con las variables Mandelstam

$$s = (p_\nu + p_N)^2 \quad (2.4)$$

$$t = (p_\nu - p_l)^2 = q^2 \equiv -Q^2 \quad (2.5)$$

$$u = (p_l - p_N)^2 \quad (2.6)$$

donde G_F es la constante de Fermi de las interacciones débiles, V_{ud} es el elemento de la matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) que acopla cada quark tipo up a todos los quarks de tipo down, $q = p_\nu - p_l$ es el cuadri-momento transferido del neutrino al nucleón, $Q^2 = -q^2$, y p_N es el cuadri-momento del nucleón inicial. En la ecuación (2.3), los signos mas y menos se refieren, respectivamente, a las dispersiones $\nu_l n$ y $\bar{\nu}_l p$. Las funciones A, B y C de Q^2 son dadas por

$$A = \frac{m_l^2 + Q^2}{m_N^2} \left\{ \left(1 + \frac{Q^2}{4m_N^2} \right) G_A^2 - \left(1 - \frac{Q^2}{4m_N^2} \right) \left(F_1^2 - \frac{Q^2}{4m_N^2} F_2^2 \right) + \frac{Q^2}{m_N^2} F_1 F_2 - \frac{m_l^2}{4m_N^2} \left[(F_1 + F_2)^2 + (G_A + 2G_P)^2 - \frac{1}{4} \left(1 + \frac{Q^2}{4m_N^2} \right) G_P^2 \right] \right\} \quad (2.7)$$

$$B = \frac{Q^2}{m_N^2} G_A (F_1 + F_2) \quad (2.8)$$

$$C = \frac{1}{4} \left(G_A^2 + F_1^2 + \frac{Q^2}{4m_N^2} F_2^2 \right) \quad (2.9)$$

Los factores F_1 , F_2 , G_A , G_P son llamados, respectivamente, factores de forma de Dirac, Pauli, axial, y pseudoescalar de el nucleón.

2.2.2. Reacción elástica - corriente neutra

Neutrinos y antineutrinos interactúan elásticamente con nucleones a través de procesos de corriente neutra

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + N \quad (2.10)$$

donde $N = p, n$.

La sección eficaz diferencial de los procesos de dispersión elástica de corriente neutra en (2.10) tienen la misma forma como la secciones eficaces de corriente cargada en (2.3), sin el factor $|V_{ud}|^2$ [18]:

$$\frac{d\sigma_{NC}^{\nu N, \bar{\nu} N}}{dQ^2} = \frac{G_F^2 m_N^4}{8\pi(p_\nu \cdot p_{N_i})^2} \left[A_N(Q^2) \pm B_N(Q^2) \frac{s-u}{m_N^2} + C_N(Q^2) \frac{(s-u)^2}{m_N^4} \right] \quad (2.11)$$

con los signos mas y menos referentes, respectivamente, a las dispersiones $\nu_l - N$ y $\bar{\nu}_l - N$.

2.2.3. Dispersión profundamente inelástica - corriente cargada

A altas energías, $E_\nu \gg m_N$ en el marco del laboratorio, interacciones neutrino-nucleón de corriente cargada son dominadas por procesos de dispersión inelástica profunda (DIS)

$$\nu_l + N \rightarrow l^- + X, \quad \bar{\nu}_l + N \rightarrow l^+ + X \quad (2.12)$$

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

Las secciones eficaces diferenciales DIS del neutrino y antineutrino están dadas por (ver Refs. [21], [16], [19])

$$\frac{d^2\sigma_{CC}^{\nu N}}{dx dy} = \sigma_{CC}^0 \left[xy^2 F_1^{W\pm N} + (1-y)F_2^{W\pm N} \pm xy \left(1 - \frac{y}{2}\right) F_3^{W\pm N} \right] \quad (2.13)$$

con

$$\sigma_{CC}^0 = \frac{G_F^2}{2\pi} s \left(1 + \frac{Q^2}{m_W^2}\right)^{-2} \quad (2.14)$$

Las variables s, Q, x, y son invariantes de Lorentz dadas por:

$$s = (p_\nu + p_N)^2 = m_N^2 + 2p_\nu \cdot p_N \quad (2.15)$$

$$Q^2 = -q^2 = 2p_\nu \cdot p_l \geq 0 \quad (2.16)$$

$$x = \frac{Q^2}{2p_N \cdot q} \quad (2.17)$$

$$y = \frac{p_N \cdot q}{p_N \cdot p_\nu} \quad (2.18)$$

Los signos mas y menos en (2.13) se refieren, respectivamente, a dispersiones ν_l y $\bar{\nu}_l$, en cuales los vectores bosón absorbidos por los nucleones son, respectivamente, un W^+ y un W^- , como indicados por los superíndices de las *funciones de estructura* $F_i^{W^\pm N}$. Estas son funciones reales de dos variables cinemáticas independientes que dependen del cuadri-momento transferido q . Es común escoger $F_i^{W^\pm N} = F_i^{W^\pm N}(x, Q^2)$ (ver Ref. [16]).

2.2.4. Dispersión profundamente inelástica - corriente neutra

Neutrinos y antineutrinos a altas energía también interactúan con nucleones a través de las reacciones DIS de corriente neutra

$$\nu_l + N \rightarrow \nu_l + X \quad (2.19)$$

donde $N = p, n$ y X denota cualquier conjunto final de hadrones. La observación en 1973 de estos procesos de corriente neutra, con $l = \mu$, en el experimento Gargamelle en el CERN y un experimento en el Fermilab, junto con la observación de las reacciones $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ en el experimento Gargamelle, deja la confirmación experimental de la existencia de interacciones de corriente neutra previstas por el Modelo Estándar.

El proceso NC DIS esta mediada por intercambio de un boson Z, con sección eficaz diferencial dada por [21]

$$\frac{d^2 \sigma_{NC}^{\nu N}}{dx dy} = \sigma_{NC}^0 \left[xy^2 F_1^{ZN} + (1-y) F_2^{ZN} \pm xy \left(1 - \frac{y}{2}\right) F_3^{ZN} \right] \quad (2.20)$$

donde

$$\sigma_{NC}^0 = \frac{G_F^2}{2\pi} s \left(1 + \frac{Q^2}{m_Z^2} \right)^{-2} \quad (2.21)$$

Los signos mas y menos en (2.20) se refieren, respectivamente, a dispersiones ν_l y $\bar{\nu}_l$. Para $Q^2 \ll m_Z^2$, se tiene que $\sigma_{NC}^0 \simeq \sigma_{CC}^0$.

Capítulo 3

El Experimento MINER ν A

MINER ν A(Main INjector ExpeRiment: ν -A) es un experimento de dispersión de neutrinos actualmente en desarrollo en el laboratorio FERMILAB de los Estados Unidos. En este experimento se usa el haz de neutrinos NuMI [55], producido en FERMILAB, para hacerlo colisionar contra un detector que ha sido cuidadosamente diseñado para medir, con alta estadística y resolución, la sección eficaz de la interacción neutrino-núcleo y examinar sus efectos. Los resultados de este experimento serán muy importantes para realizar estudios precisos de la oscilación de neutrinos que son de interés teórico y experimental puesto que implican que el neutrino tiene masa no nula.

3.1. MINOS y el Hall NuMI

MINOS [47] es un experimento, que se desarrolla también en el laboratorio FERMILAB, diseñado para observar el fenómeno de oscilación de neutrinos, cuya observación contribuye a la medida de la masa de los diferentes tipos de neutrinos. El experimento MINOS cuenta con 2 detectores: el detector MINOS Near y el detector MINOS Far, el primero ubicado en FERMILAB y el segundo a 724 kms de distancia al norte de Minesota, en una mina subterránea en Soudan.

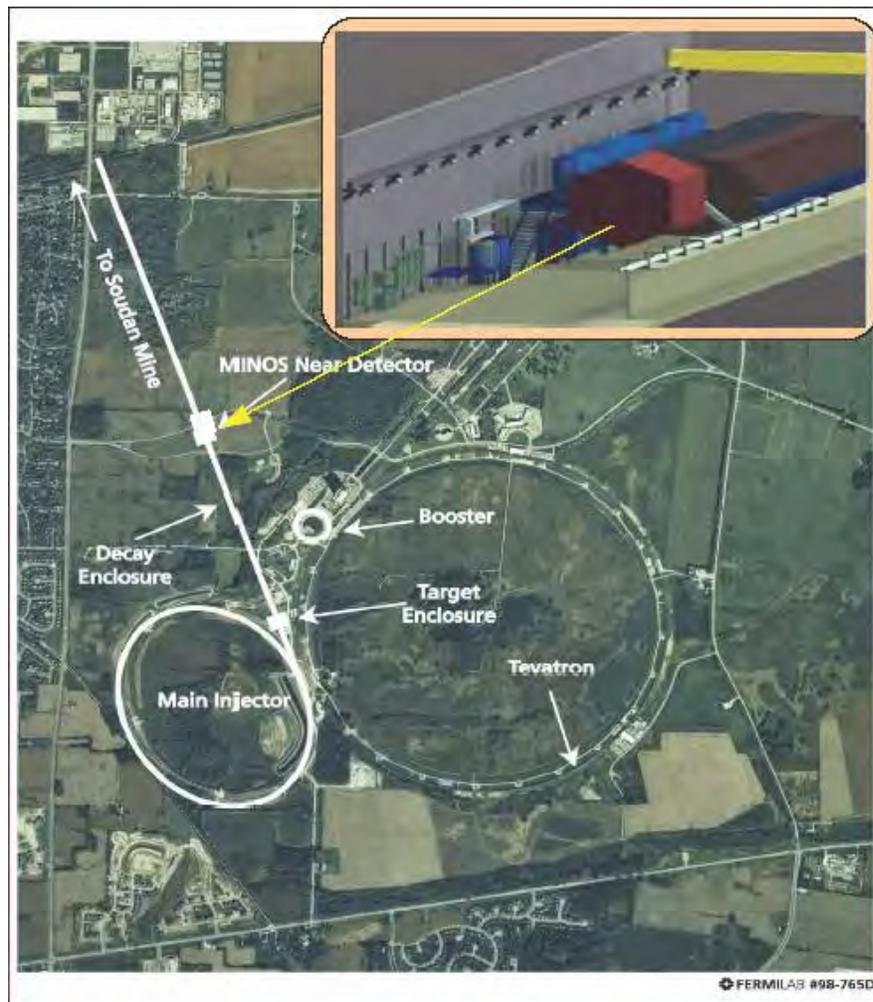


Figura 3.1: Localización del detector MINER ν A en el laboratorio FERMILAB

El hall NuMI es el lugar en FERMILAB donde se localiza el detector MINOS Near. El detector del experimento MINER ν A ha sido colocado en el hall NuMI delante del detector MINOS Near, en frente del haz de neutrinos NuMI.

3.2. El haz NuMI o NuMI Beam

NuMI es un haz de neutrinos muónicos ν_{μ} producido utilizando el acelerador de partículas “Tevatrón” del laboratorio FERMILAB.

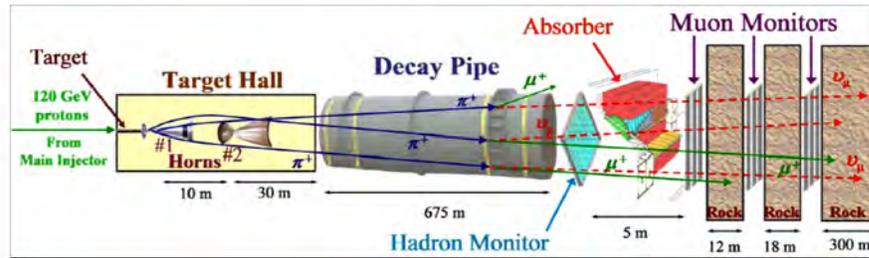


Figura 3.2: El haz NuMI se obtiene al producir un haz de piones que se desintegran según la reacción: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

Para producir estos neutrinos, se hace apuntar un haz de protones, del inyector principal del acelerador, a un blanco de carbono. La interacción provoca un haz de piones (o mesones pi) algunos de los cuales se desintegran en neutrinos del muon en dirección al detector. Los neutrinos viajan a una velocidad cercana a la luz, no son afectados por campos gravitacionales ni magnéticos, y por sus propiedades particulares, pueden viajar directamente a través de la corteza terrestre sin ser afectados.

Configuraciones de energía del haz NuMI

El espectro de energía de los neutrinos del haz NuMI puede ser ajustado a diferentes niveles. Las tres configuraciones estándar de energía son: Energía Baja (LE), Energía Media (ME) y Energía Alta (HE) (ver 3.3).

MINER ν A trabajará, junto a MINOS, utilizando la configuración de energía baja (LE) del haz NuMI durante 1 año; y, junto a NO ν A, utilizando la configuración de energía media (ME) durante 3 años.

3.3. Objetivos del experimento MINER ν A

EL experimento MINER ν A y el haz NuMI ofrecen una oportunidad única para explorar un amplio espectro de tópicos de física de neutrinos [6]. Algunos nunca han

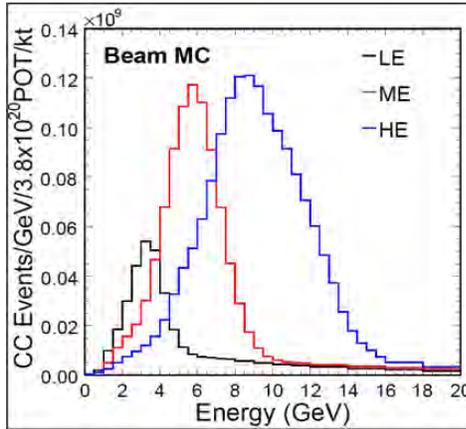


Figura 3.3: Distribución de energía de los neutrinos para las tres configuraciones estándar del NuMI Beam

sido estudiados, mientras que otros están plagados de extensos errores estadísticos y sistemáticos, debido a los escasos datos. MINER ν A incluirá estudios de alta estadística de todos los tópicos listados abajo, estos estudios son importantes para las comunidades de física de partículas y física nuclear:

1. Medida precisa de la sección eficaz de la interacción cuasielástica neutrino-nucleón y factor de forma axial del nucleón [9] [3].
2. Determinación de la sección eficaz, en la región de resonancia, para interacciones de corriente cargada (CC) y corriente neutra (NC).
3. Medida precisa de la sección eficaz en la producción coherente de piones.
4. Estudio de efectos nucleares en interacciones del neutrino [1] [2].
5. Estudio de efectos nucleares en mediciones de $\sin^2 \theta_W$.
6. Exploración de la región de transición W (masa hadrónica) donde la producción resonante se fusiona con la dispersión inelástica profunda (DIS).
7. Mejorar la medición de las funciones de distribución partónicas (PDF).

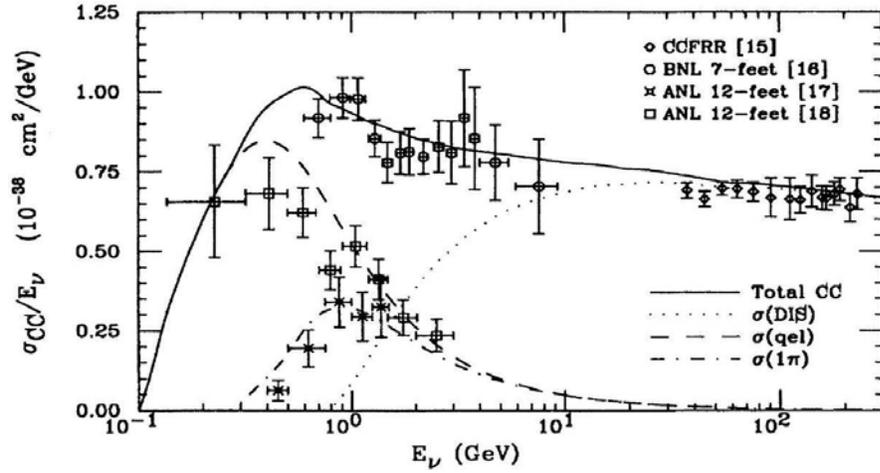


Figura 3.4: Sección eficaz total para la dispersión del ν_μ

8. Examinar la contribución exponencial de QCD perturbativa.

De esta manera, MINER ν A proporcionará información crucial para actuales y futuros experimentos para medir la oscilación de neutrinos.

La figura 3.4 muestra los datos disponibles de la sección eficaz total de la dispersión de los neutrinos muónicos hasta aproximadamente 200 GeV. de energía del neutrino incidente. La precisión de los datos de la sección eficaz a energías moderadas (de 1 a 20 GeV aproximadamente) es bastante pobre, lo que es clave en los errores sistemáticos de las medidas precisas en los experimentos de oscilación de neutrinos. Junto con el haz NuMI, el experimento MINER ν A será capaz de mejorar la calidad de estos datos en el rango de energía de 1 a 15 GeV. aproximadamente.

A dichas energías la contribución a la sección eficaz total de interacción neutrino-núcleo esta dado principalmente por la dispersión cuasi-elástica, por la producción de resonancia y por la dispersión inelástica profunda:

$$\sigma_{TOT} = \sigma_{QE} + \sigma_{RES} + \sigma_{DIS}$$

donde

$$\sigma_{QE} : \text{Dispersión cuasi-elástica} \rightarrow \nu(\bar{\nu})n(p) \rightarrow \mu^-(\mu^+)p(n) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{RES} : \text{Producción resonante} \rightarrow \nu N \rightarrow \mu N^* \quad (3.2)$$

$$\sigma_{DIS} : \text{Dispersión inelástica profunda} \rightarrow \nu N \rightarrow \mu X \quad (3.3)$$

3.4. El detector del Experimento MINER ν A

El detector de MINER ν A es un híbrido de un detector de centelleo segmentado y de un detector calorímetro tradicional ???. Actualmente ya se encuentra totalmente construido y está en la etapa de toma y análisis de datos.

El detector esta constituido por 108 piezas modulares que son ensamblados sobre un soporte de forma perpendicular al haz NuMI. Cada *módulo* esta constituido de un anillo hexagonal de acero, algún acero extra y/o material absorbedor (plomo), uno o dos planos de centelleo en el centro del anillo, y un conjunto de barras de centelleo anidados en cada uno de los 6 lados del anillo hexagonal de acero. EL detector completo tiene aproximadamente 3.5m de ancho, 4m de alto y 4.6m de largo, y pesa aproximadamente 180ton.

Cuenta con atributos particulares que permiten reconstruir la cinemática de los eventos con suficiente exactitud para poder determinar la dinámica de la interacción de los neutrinos.

3.4.1. Vista general del detector

El detector completo de MINER ν A puede describirse en 2 partes: el Detector Interno (ID) y el Detector Externo (OD).

El *Detector Interno*, completamente activo, esta dividido en 4 secciones: Blanco Nu-

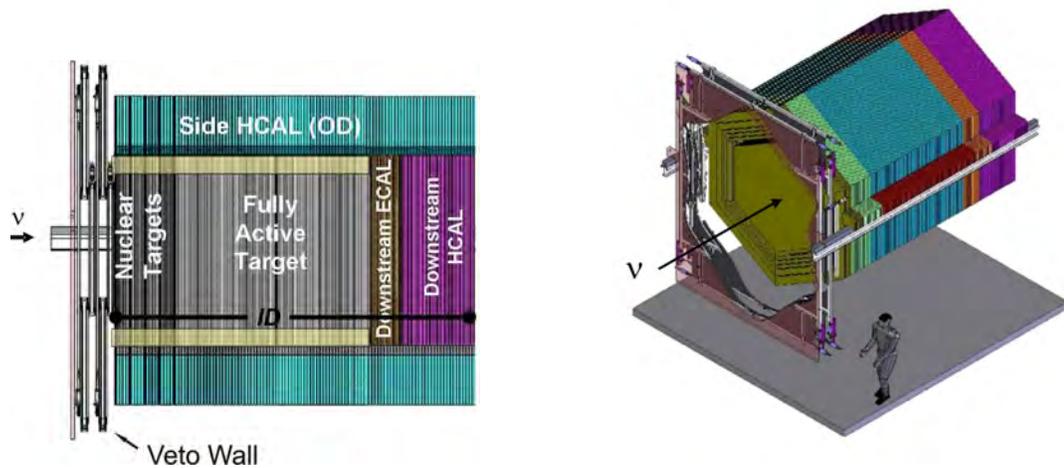


Figura 3.5: Izquierda: Vista lateral esquemática del detector de MINER ν A. Derecha: Vista isométrica del detector mostrando el Veto Wall y parte del soporte.

clear, Blanco Activo, Calorímetro Electromagnético (ECAL) y Calorímetro Hadrónico (HCAL). Cada sección es construida por una combinación de planos hexagonales de material centellador (planos de centelleo) y de planos hexagonales de material absorbente. Los materiales absorbentes que serán utilizados son:

- Hojas de Plomo (en el Blanco Nuclear y en el Calorímetro electromagnético)
- Hierro (en el Blanco Nuclear)
- Hojas de aleación de Hierro y Carbono: Acero (en el Calorímetro hadrónico)
- Carbono (en el Blanco Nuclear)

El detector de MINER ν A es mostrado esquemáticamente y en una vista isométrica en la Figura 3.5. La figura también muestra el "Veto Wall" situado al frente del detector, el cual será responsable de identificar eventos causados por partículas cargadas que entran por el frente del detector.

La primera sección del Detector Interno es reservada para blancos nucleares. Estos blancos serán hechos de arreglos de hojas de carbón, hierro y plomo. La masa total de

	Módulos	Planos centelladores
Blanco Nuclear	18	36
Blanco Activo	60	120
ECAL	10	20
HCAL	20	20
Total	108	196

Tabla 3.1: Número de módulos y planos centelladores en cada sección del detector interno

cada absorbente (blanco) es aproximadamente 1.2tons. Estos arreglos serán intercalados con planos de centelleo para vértices de reconstrucción.

La segunda sección es el Blanco Activo. Esta sección contiene 120 planos de centelleo organizados en 60 módulos de rastreo. Cada plano de blanco activo es anillado por una sección del calorímetro electromagnético de aleación plomo-acero. Esta hoja es de 0.2 centímetros de grueso y cubre el 12% del área plana.

El blanco activo es seguido por el calorímetro electromagnético. Esta sección es hecha de 10 módulos de rastreo. Cada plano de centelleo es intercalado con hojas de aleación plomo de 0.2cm de grueso, cubriendo todo el área activa entera. El calorímetro electromagnético tiene 12 hojas de absorbente.

La sección final del detector interno es el calorímetro hadrónico. Este es similar en diseño al calorímetro electromagnético; la diferencia clave es el hierro absorbente. El calorímetro hadrónico tiene 20 módulos de rastreo, cada plano centellador cubierto por 2.54cm de una hoja de hierro. El calorímetro hadrónico tiene 20 hojas de hierro.

El Detector Interno entero es rodeado por el *Detector Externo*, un calorímetro hadrónico de Hierro, que sirve también como estructura de soporte para la construcción del detector. Cada sección de este marco hexagonal contiene ranuras para tiras sólidas de centelleo de sección rectangular (aprox 1,9cmx1,5cm).

El detector interno y el detector externo juntos requieren más de 31.000 canales para

ser leídos. Para cuatro años de funcionamiento en modo predominante de gran energía, aproximadamente 13 millones de eventos serán recogidos en el detector MINER ν A. Más de la mitad de estos eventos serán en el blanco activo de poliestireno (aproximadamente 3 toneladas de masa). Aproximadamente 1.4 millones de eventos son esperados en cada uno de los blancos nucleares, produciéndose así una excelente muestra de los eventos.

3.4.2. Planos de Centelleo

Los *planos de centelleo* son los elementos básicos del detector y son construidos de tiras sólidas de sección triangular, de 33mm de base por 17mm de alto (rango en longitud de 120 a 240cm), hechas de poliestireno y dióxido de titanio. La geometría triangular de las tiras que forman los planos de centelleo permitió mejorar la resolución de las coordenadas de posición de las partículas. Cada tira tiene un agujero de 1.4mm de diámetro en el cual se inserta una fibra WLS (Wave Length Shifting). Las tiras son organizadas, en 2 capas, en planos hexagonales de 64 tiras de ancho, para un total de 128 tiras por plano de centelleo.

Los planos de centelleo, dependiendo de la orientación de las tiras, están colocados de 3 diferentes formas en el detector: plano X (tiras en posición vertical), plano U (tiras rotadas $+60^\circ$ respecto de la vertical) y plano V (tiras rotadas -60°). Las diferentes orientaciones de las tiras permiten una reconstrucción tridimensional de las trayectorias.

Un módulo, utilizado para el rastreo de partículas, está constituido por un plano X y un plano Y (módulo XU) o por un plano X y un plano V (módulo XV).

Elementos activos y pasivos del detector tejas centelleantes de ATLAS

La fracción de energía absorbida es medida en el material activo y el material pasivo es utilizado únicamente para que las partículas que lo atraviesan interactúen en el y se vayan frenando, perdiendo su energía inicial.

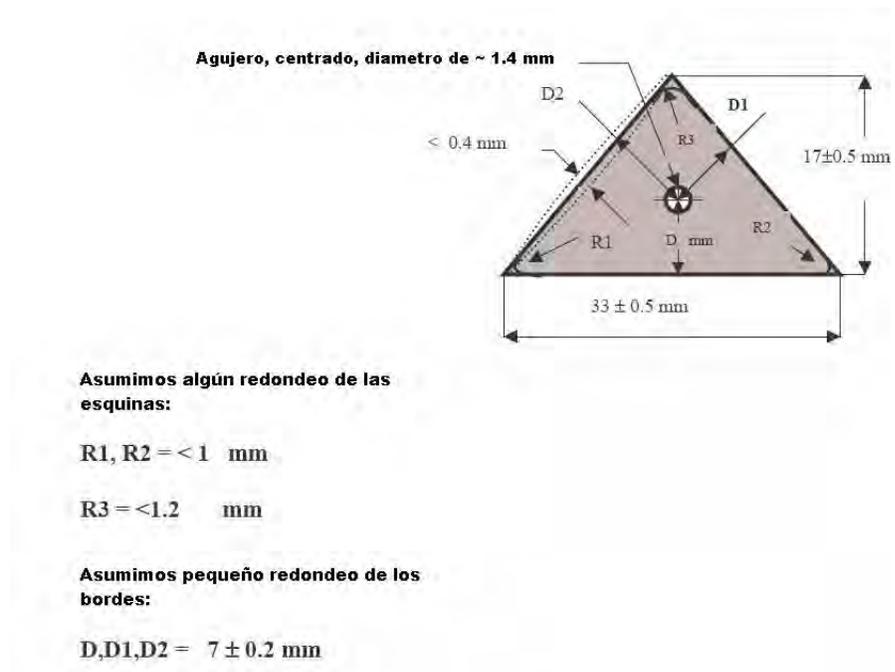


Figura 3.6: Dimensiones de la sección triangular de la tiras utilizadas para la construcción de los planos de centelleo

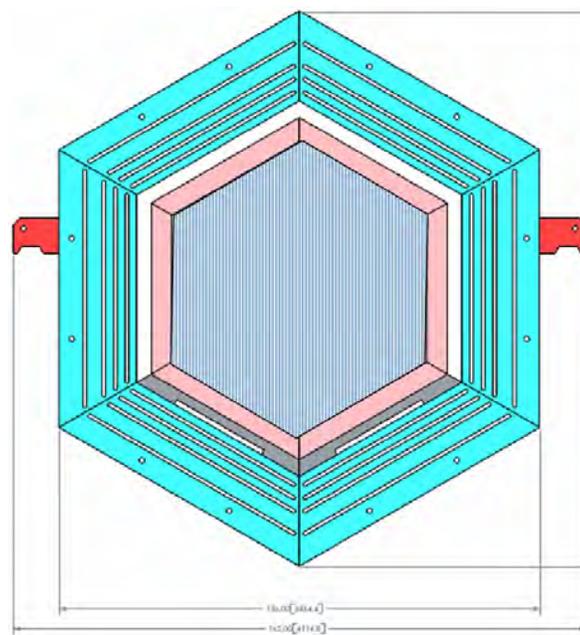


Figura 3.7: Vista frontal del detector MINERνA para ilustrar forma y escala

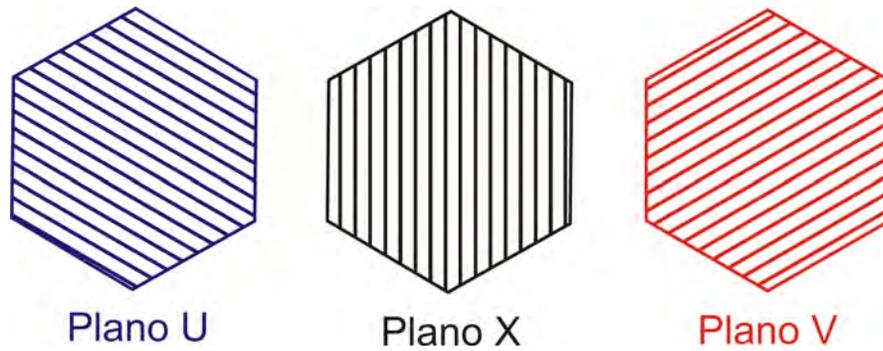
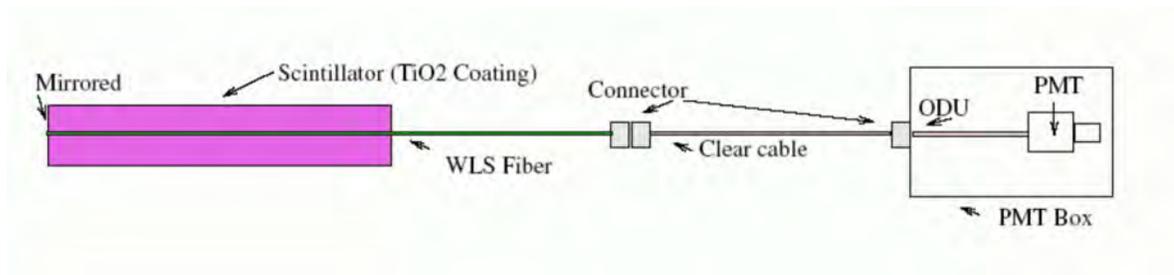


Figura 3.8: Planos

Figura 3.9: Sistema óptico del experimento MINER ν A

3.4.3. Sistema óptico MINER ν A

Las partículas ionizantes que atraviesan las tiras centelleantes del detector producen luz con una longitud de onda en la región del ultravioleta y con una intensidad proporcional a la energía depositada por las partículas. Esta luz se propaga en el interior de las tiras y es absorbida por una fibra interior que aumentan la longitud de onda de la luz con el fin de optimizar la eficiencia de recolección de los fotomultiplicadores. Estas fibras que se denominan Wave Length Shifting (WLS) están incrustadas en las tiras según la dirección radial y la luz se propaga en su interior sin grandes pérdidas mediante reflexiones internas, y están conectadas a fotomultiplicadores que actúan como elementos de lectura.

El agrupamiento de un conjunto de fibras provenientes de diferentes tiras definen regiones denominadas celdas de lectura (o de muestreo).

Descripción de componentes:

- Las tiras centelladoras; consisten de un núcleo de poliestireno dopado con componentes fluorescentes, de una capa exterior de TiO_2 para reflectividad, y un agujero en el medio para una fibra WLS. Estas tiras son preparadas con una sección transversal triangular (3.3cm de base y 1.7cm de altura) para el Detector Interno (ID), y con un perfil rectangular 1.9cm de base por 1.5cm de altura para el Detector Externo (OD).
- Las fibras WLS; consisten de fibras Y11 175 ppm de dopaje, multicapas con 1.2 mm de diametro. Estas fibras son pegadas dentro del agujero de los centelladores usando un pegamento óptico (resina de Epon con endurecedor TETA).
- Cables y Conectores Opticos; para llevar la luz de los modulos del detector a los fotodetectores.
- Tubos Fotomultiplicadores; La luz de cada uno de los aprox. 30,000 centelladores en MINER ν A deberá ser convertido a un pulso eléctrico que lleve información precisa del tiempo y tenga una amplitud proporcional a la energía depositada. Esto es hecho con fotomultiplicadores (PMT) de razonable ganancia y buena linealidad. Para salvar costo, son usados PMTs multianodos con 64 pixeles. El detector MINER ν A requerirá 473 PMTs. Cada PMT esta sentado en un tubo de acero llamado PMT Box. Nosotros utilizaremos los tubos fotomultiplicadores multianodo R7600-00-M64 de Hamamatsu Photonics.

Todos los requerimientos técnicos en el sistema óptico han sido establecidos por una combinación de estudios físicos y consideraciones prácticas [4].

3.4.4. Calorímetros y Blancos

Uno de los principales objetivos de MINER ν A es mejorar el calculo de la energía del neutrino incidente basado en la energía visible. El objetivo físico de MINER ν A requiere medición de las energías de partículas cargadas y neutras con energías hasta unos pocos GeV. Los elementos de MINER ν A son : un detector central completamente activo, un arreglo de plomo y centellador alternante y circundante al detector activo como calorímetro electromagnético, un arreglo de acero y centellador alternate y fuera del detector como calorímetro hadrónico.

El criterio general para el calorímetro es que la energía hadrónica y las cascadas electromagnéticas originadas en la región de rastreo central deben ser completamente contenidas.

Calorímetros Electromagnéticos

La detección de fotones de alta energía es através del proceso de producción de pares y de radiación bremsstrahlung, gobernado por una lluvia de e^+ , e^- y γ . Puesto que la sección eficaz de la producción de pares es proporcional a Z^2 , hojas de plomo son generalmente usadas para producir una cascada de razonable longitud. La longitud característica de la cascada varía con la energía, para fotones hasta unos pocos GeV, 99% de la energía será contenida dentro de 4cm de Pb. La resolución de energía esperada es aproximadamente $6\%/\sqrt{E}$, con E en GeV.

Calorímetros Hadrónicos

La resolución del calorímetro hadrónico, basado en estudios por MINOS, se espera que sea aproximadamente $50\%/\sqrt{E}$ para energías del hadrón alrededor de 1 GeV. La resolución para partículas de baja energía es esperado a ser 50% o menos, dependiendo

de la energía. La razón primordial para la pobre resolución es la interacción muy probable de la partícula con un núcleo antes de parar, la cual frecuentemente produce uno o mas neutrones energéticos cuyas energías no son observadas, haciendo así difícil para conseguir buena resolución de energía.

Estudios muestran que la componente hadrónica visible de eventos cuasielásticos y resonantes originados en la región central activa del detector son completamente contenidos, excepto neutrinos secundarios y neutrones de baja energía.

Para estudiar la resolución de energía E_h del calorímetro MINER ν A, este fue simulado usando GEANT3, la respuesta del detector a un neutrino generado a lo largo del detector interior fue simulado por NUANCE, sobre blancos de carbono e hidrogeno. De este ejemplo simulado, eventos donde todos los fragmentos hadrónicos fueron contenidos dentro de MINER ν A fueron usados.

En un calorímetro centellador completamente activo, el rendimiento total debe ser esencialmente proporcional a E_h

Blancos Nucleares

Los blancos nucleares MINER ν A consistirán de carbono, hierro y plomo. Hidrógeno está también presente como un componente del centellador en el blanco activo. Hierro es escogido tanto como un blanco de masa media relativamente económico y como el material absorbente usado en muchos detectores de neutrinos, tal como MINOS. Plomo es el material de mayor masa nuclear que sea fácilmente obtenible.

Hay un número de criterios que determinan el diseño del blanco nuclear. El arreglo ideal de blancos nucleares podría tener muchos blancos delgados con varias capas de rastreo en medio de cada blanco a fin de determinar la multiplicidad de los estados finales y la cantidad de energía que opera dentro de partículas de baja energía. Hay un número de factores, los cuales limitan el número y tamaño de los blancos, así como el

número de capas de rastreo.

La resolución espacial intrínseca del detector es de 1cm de orden, así que blancos mas delgados serán ineficientes. MINOS usa láminas de hierro de 2.5cm, así laminas mas delgadas que estas no permiten mejora significativa del conocimiento del espectro de partículas de baja energía, lo cual es uno de los objetivos de MINER ν A. Para conseguir suficiente estadística sobre una amplia variedad de materiales, nos gustaría idealmente 1 ton de cada blanco.

El número de frames requeridos para determinar un solo punto estéreo es dos (un XU y un XV). Nosotros deberíamos tener como mínimo dos de estos puntos, o cuatro frames, entre blancos para determinar la trayectoria de pequeñas huellas antes de que ellos ingresen al siguiente detector. Un espesor de 4 frames para un protón de 200 MeV. Sin embargo, puesto que nosotros deseamos usar MINOS para identificación de muones, no podemos poner demasiados planos de rastreo entre blancos o usar demasiadas laminas puesto que el blanco upstream estará entonces muy lejos de MINOS y una larga fracción de los muones se perderá MINOS. En adición, estamos interesados en tener una configuración de detección similar para cada uno de los tres materiales.

El diseño que nosotros escogimos se muestra esquemáticamente abajo. Cada F representa un frame, cualquiera XU o XV, y un par FF sera un set de XUXV.

FF Pb/Fe[1] FFFF Pb/Fe[2] FFFF Pb/Fe/C[3] FFFF Pb[4] FFFF Pb/Fe[5]

Blancos [1] y [2] serán capas de Pb y Fe de 2.5 cm montadas en un plano. La cobertura superficial será 60 % Fe y 40 % Pb, lo cual da aproximadamente 230 Kg de Pb y Fe en cada blanco dentro de un radio de 80 cm. El blanco [3] tendrá una cobertura superficial de 50 % de C, 30 % Fe, y 20 % Pb, cual da 140 Kg de C y 110 Kg de Pb y Fe. Los blancos de Pb y Fe otra vez serán capas de 2.5 cm, y el blanco de C capa de 7.5 cm. El blanco [5] será capa de 0.75 cm de plomo puro, con una masa de 170 Kg. El

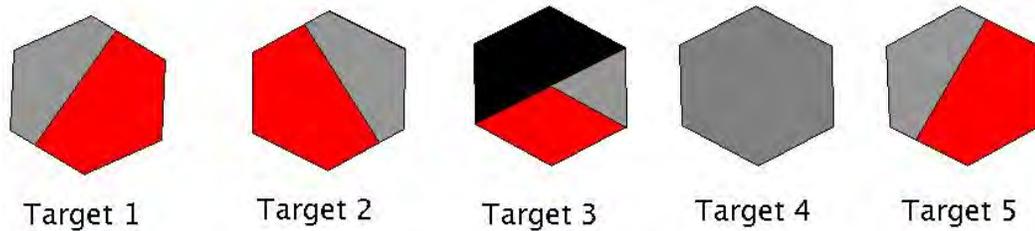


Figura 3.10: Blancos Nucleares

blanco [6] es una capa de 1.25 cm de Pb y Fe, otra vez 60 % cobertura superficial en Fe y 40 % en Pb, con una masa de aproximadamente 115 Kg cada uno.

La masa total de Fe y Pb es 685 Kg y 855 Kg, respectivamente. El número esperado de eventos CC es aproximadamente 2.0 millones para Fe, 2.5 millones para Pb, y 400000 para C.

Los primeros 2 frames nos permitirán determinar si una partícula que pasa a través del veto detector se origina en el primer blanco nuclear o fuera del detector. Los blancos [1] y [2] tendrán el Pb y el Fe rotado con respecto de cada uno para permitir buscar diferencias en detección. El blanco [3] contiene los tres núcleos con esencialmente la misma capacidad de detección para permitir estudios detallados de la dependencia A de las interacciones. El blanco [4] es plomo puro para asegurar que cualquier fotón producido empiece una cascada. La hoja de plomo es suficiente para empezar la cascada pero no suficiente para contenerla. El blanco [5], directamente upstream del detector central completamente activo nos permitirá estudiar multiplicidad y distribuciones de partículas de baja energía con buen seguimiento y resolución de energía.

Capítulo 4

Desarrollo del MINER ν A Mapper Mover

MINER ν A Mapper Mover es el software que se desarrolló para controlar el movimiento de las fuentes radiactivas que se utilizarón para mapear los módulos de detector MINER ν A.

4.1. Mapeo de los módulos del detector MINER ν A

Cada módulo del detector es mapeado luego que ha sido ensamblado. El propósito del mapeo de los módulos es estudiar la respuesta local del centellador. El mapeo escanea el centellador de todos los módulos del detector en puntos predeterminados con una fuente radiactiva. La respuesta del centellador es registrado por un computador como una función de la posición.

El mapeo permite identificar cualquier irregularidad en el centellador que afecta el rendimiento del detector, de esta manera se puede tener en cuenta estos detalles durante el análisis de datos. El mapeo es también una de las principales medidas de control de calidad para cada módulo montado.

El *módulo mapper* consiste de un marco de acero muy pesado y un carruaje de bar-

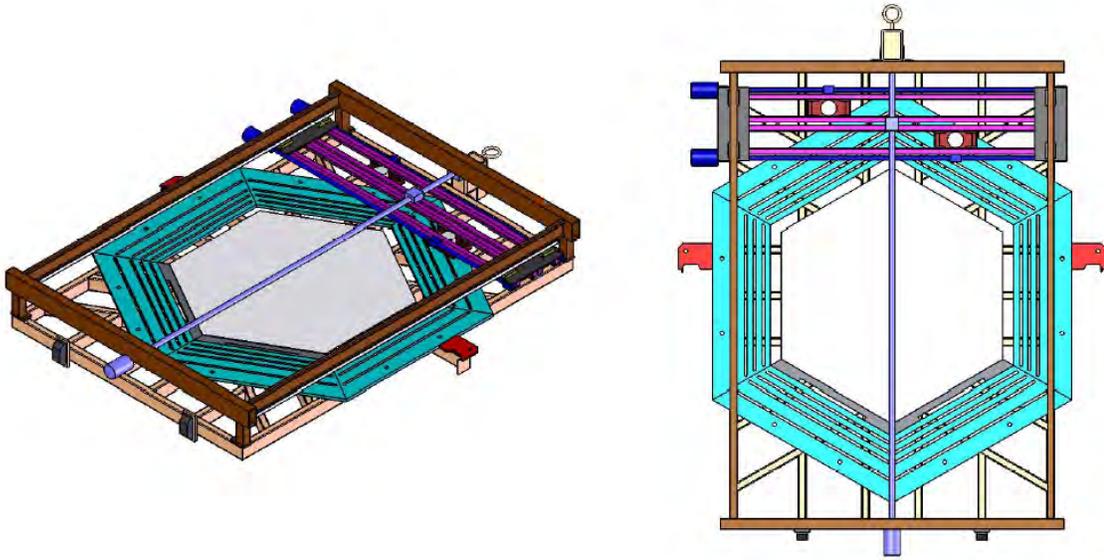


Figura 4.1: Esquema del módulo mapper

rido que incorpora dos cabezas de exploración (ver 4.1). El marco es lo suficientemente grande como para contener un módulo ensamblado y lo suficientemente rígido para soportar el estrés de la elevación repetida. Cada cabeza de exploración incorpora una fuente radiactiva de 5-10 mili Curie de Cs-137 (isótopo radiactivo de Cesio) blindado en un cono de plomo. Las cabezas de exploración viajan sobre rieles, el movimiento es proporcionado por tornillos de posicionamiento accionados por motores eléctricos. Los motores son controlados por un computador.

Cuando un módulo es mapeado, la respuesta del centellador es leída usando PMTs M64 y un sistema electrónico controlado por computador. El objetivo del diseño del mapper es de realizar una exploración segura de cada módulo dentro de un plazo de 10 a 12 horas.

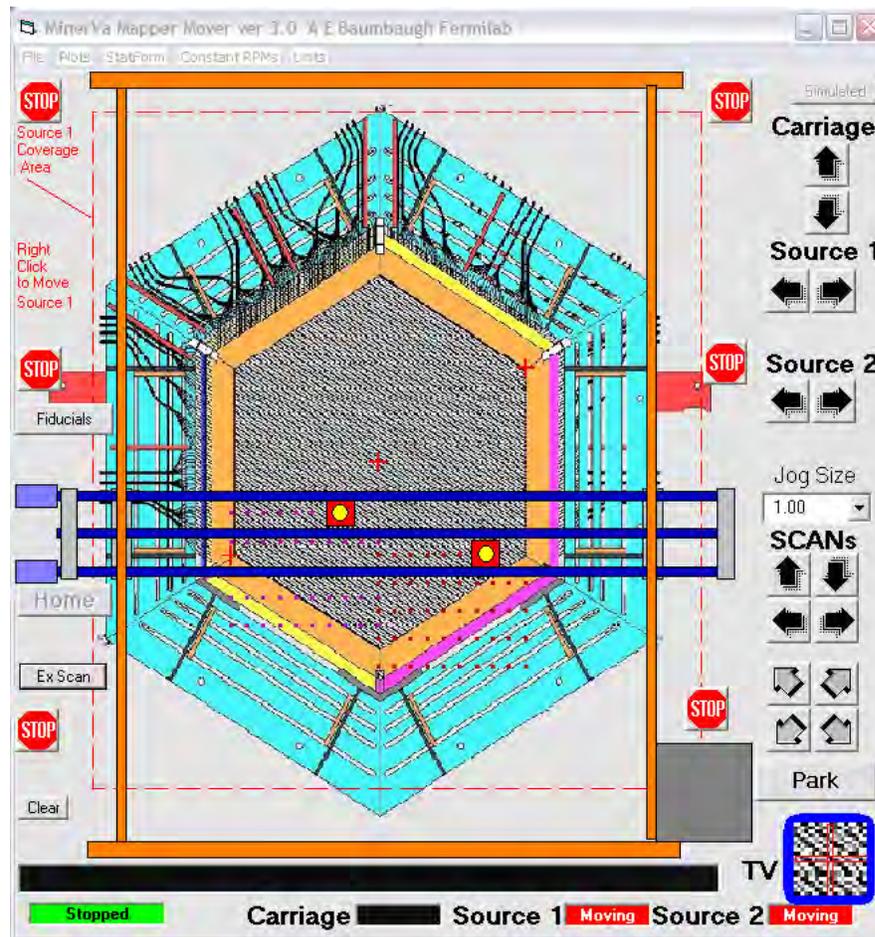


Figura 4.2: Simulador del módulo mapper

4.2. Software para el control del movimiento de las fuentes

Para controlar el movimiento de las fuentes radiactivas y simular el mapeo de los módulos se ha desarrollado un software gráfico interactivo en Visual Basic.

Cuando se ejecuta el programa se abre un Viewer y se despliega una ventana como en 4.2.

Inicialmente las fuentes se encuentra en su posición de parqueo (caja gris) en la parte baja derecha.

El conjunto de flechas en la parte superior (Carriage, Source 1, Source 2) puede ser usado para mover el carruaje hacia arriba o abajo y mover las 2 fuentes individualmente a la izquierda o derecha.

La imagen virtual de TV en la parte baja derecha muestra una ampliación del módulo directamente bajo la fuente 1.

El conjunto inferior de 8 flechas es usado para simular un movimiento de escaneo: arriba, abajo, izquierda, derecha, o diagonal. Estos botones mueven ambas fuentes a la vez.

El boton “Park” retorna las fuentes a su posición de almacenamiento. Cualquiera de los 6 botones “Stop” detiene todo movimiento, simulando una condición de parada de emergencia.

4.3. Simulación del escaneo

Note 2 signos “+” sobre la imagen del módulo, uno en la esquina inferior izquierda del hexágono interior y uno en la esquina superior derecha del hexágono. Estos están destinados para representar los puntos de referencia (fiducials), que permiten al mapper fijar su sistema de coordenadas interno al módulo que está escaneando.

Fijar fiducial 1: Mover la fuente 1 aproximadamente encima de fiducial 1, luego centrar el signo “+” en el punto de mira de la TV virtual, y click el boton “Fiducial”.

Fijar fiducial 2: Mover la fuente 1 aproximadamente encima de fiducial 2, luego centrar el signo “+” en el punto de mira de la TV virtual, y click el boton “Fiducial”.

Así el mapper tiene toda la información que necesita para fijar el sistema de coordenadas del módulo al sistema de coordenadas del mapper.

Para ejecutar un escaneado se presiona el boton “Ex Scan”, que pedirá seleccionar un archivo que debe contener una lista de escaneo. Estos archivos deben tener la extensión

.scan o .SCAN y el siguiente formato: un punto de escaneo es ingresado por coordenadas de carriage (Y), Source 1 (X1) y Source 2 (X2) relativos a los 2 fiducials. Las coordenadas deben ser separadas por comas y no deben haber espacios en blanco.

Cualquier línea comenzando con “apóstrofe” es una línea de comentario y no es ejecutada.

Ejemplos:

```
-40,40,60
-40,50,50
```

La primera línea mueve el carruaje a -40, la fuente 1 a 40 y la fuente 2 a 60; la segunda línea mueve el carruaje a -40, la fuente 1 a 50 y la fuente 2 a 50.

También se puede ingresar un conjunto de puntos de medición (escaneo) como una línea. El formato para esto es: la palabra “line” seguida por los valores de inicio Y,X1,X2 seguido por los valores de final Y,X1,X2 seguido por el número de puntos a tomar menos 1.

Por ejemplo el siguiente comando:

```
line ,100,100,90,0,20
```

mueve el carruaje a 0, fuente 1 a 100, fuente 2 a 100 y toma una lectura, luego toma 20 lecturas mas uniformemente moviéndose hasta la posición final donde carruaje esta en 100, fuente 1 esta en 90, y fuente 2 esta en 0.

4.4. Optimización del camino del mapper

Para optimizar el proceso de mapeo de los módulos, se plantea el siguiente diseño para la trayectoria de las fuentes:

- Camino perpendicular a las fibras ópticas

- Camino de las fuentes tal que no exista interferencia (ambas fuentes no iluminan un mismo canal a la vez)
- 20 puntos por canal
- 1280 puntos por plano

Tiempo estimado del escaneado por plano:

Se requiere de 15 segundo por punto, incluido viaje de la cabeza, iluminación y lectura.

El escaneo de un plano tomaría: $1280 \text{ puntos} \times 15 \text{ s/punto} = 19200 \text{ s} = 5.33 \text{ horas}$

Pero como se ilumina 2 canales a la vez (2 fuentes): $5.33 \text{ horas} / 2 = \mathbf{2.66 \text{ horas}}$



(a) Mapper mover



(b) Modulo mapper

Figura 4.3: Fotografías que muestran las posiciones del mapper mover y del módulo mapper en el hall MINERνA

Capítulo 5

Empaquetamiento y distribución del Software MINER ν A

5.1. Vista general del Software MINER ν A

El Software MINER ν A se desarrolló para operar, simular, reconstruir, analizar, y visualizar los datos del experimento MINER ν A. Fue construido sobre la base del software del experimento LHCb ¹, es decir reutilizando y/o modificando paquetes específicos del software de dicho experimento. El software del LHCb ha sido construido sobre el framework GAUDI [66] y las librerías LCG [67].

GAUDI es un framework o estructura de soporte de software sobre el cual son construidas las diferentes capas del software que necesita un determinado experimento. GAUDI depende de un subconjunto de librerías del software LCG y es usado por los experimentos LHCb [68], ATLAS [69], GLAST [70] y HARP [71]. Es mantenido y manejado por los desarrolladores de GAUDI en el CERN.

LCG es un conjunto de librerías y herramientas mantenidas por el proyecto Linear Computing Grid del CERN. LCG incluye herramientas como ROOT [73] y GEANT4

¹ El LHCb (que procede de las siglas “Large Hadron Collider beauty experiment”, donde “beauty” se refiere al quark bottom) es uno de los seis detectores de partículas instalados en el LHC (Large Hadron Collider) del CERN.

[75], este último es utilizado para simular el paso de partículas a través del detector del experimento. Es usado por todos los experimentos del LHC en el CERN y por el experimento MINER ν A en Fermilab. Está mantenido por una combinación de autores externos y por el proyecto LCG, y es manejado por el personal del LCG.

El Software MINER ν A ha sido construida como una capa sobre las capas de software antes mencionadas, de tal forma que es esta capa final la única que es sujeta a modificación por los desarrolladores del software del experimento MINER ν A.

Interacciones de neutrinos en el detector son simulados usando el generador de eventos de neutrinos GENIE [52].

5.2. Empaquetamiento del Software MINER ν A

Uno de los grandes problemas del software MINER ν A fue que no era flexible de ser desarrollado, sobre todo fuera del Fermilab, aquí se describe un método creado para transmitir, instalar, usar y poder desarrollar el software MINER ν A vía un CD físico o imagen que puede ser descargado de la Web. Para esto no es necesario obtener acceso a los repositorios CVS Minerva en Fermilab y ningún tipo de conexión a Internet ya que este CD contiene todos los archivos y paquetes que se necesitan para fijar una instalación inicial del software Gaudi/LHCb/Minerva.

Se puede obtener una imagen del CD en el siguiente link:

```
http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/RetrieveFile?docid=1741&version=3&filename=MinervaSoftware-CD.iso
```

El código md5sum para validar la copia es: f3e6d18dc8379dd38658224e90290ff5

5.2.1. Requerimientos del sistema

El software esta formalmente soportado sobre Scientific Linux Fermi 4 con compilador gcc versión 3.4.6. Es soportado tambien sobre Scientific Linux Fermi 3 con compilador gcc 3.2.3. Debe ser compatible con otros tipos de Linux pero apropiadamente configurados. Tiene además soporte sobre Windows.

5.2.2. Instrucciones de instalación

Estas instrucciones describen como instalar el software MINERvA usando el CD bajo Linux. Las instrucciones fueron escritas usando Scientific Linux Fermi 4.4 (SLF) 2.6.9-42.0.10.ELsmp con compilador gcc versión 3.2.3 20030502 (Red Hat Linux 3.2.3-47.3).

1. Crear un directorio para instalar el software, por ejemplo (como root puede crear el directorio de instalación en):

```
$ mkdir -p /minerva/sw
$ /minerva/sw
```

2. Copiar el script instalador de el CD. Por ejemplo asumiendo que usted tiene montado el CD-ROM como /media/cdrecorder usted puede usar el comando:

```
$ cp /media/cdrecorder/minerva-installer-CD.sh ./
```

3. Finalmente usted necesita ejecutar el script instalador dando dos parámetros, el camino del directorio de instalación y el punto de montaje del CD-ROM, por ejemplo:

```
$ source minerva-installer-CD.sh /minerva/sw /media/cdrecorder
```

5.2.3. Que está en el CD

El CD contiene los paquetes necesarios para la instalación del software Gaudi/LHCb/MINER ν A, scripts para instalar los paquetes, y además páginas tutoriales .html de como instalar el software usando el CD y como comprobar la instalación ejecutando algunos de los principales programas de simulación.

Contenido:

1. **Welcome.html** Pagina principal .html de presentación del CD, desde donde se puede acceder a las otras paginas tutoriales .html del CD
2. **minerva-installer-CD.sh** Shell script principal que maneja otros scripts para instalar todo el software
3. **/Bootstrap** Contiene el archivo Bootstrap.tar.gz que empaqueta y comprime tres subdirectorios /CVS, /install, /setup que contienen los scripts necesarios para instalar y configurar localmente todo el software.
4. **/lhcbproject/dist** Contiene subdirectorios de todos los paquetes LHCb necesarios como GAUDI, GAUSS, GEANT4, PANORAMIX, . . . , cada cual contiene sus respectivos archivos .tar.gz
5. **/targz** Contiene todos los archivos .tar.gz. necesarios para recompilar los proyectos WRIGHT y MINER ν A

5.2.4. Estructura de los archivos de instalación

Los archivos de instalación han sido escritos en lenguaje SHELL. El script *minerva-installer-CD.sh* maneja todo el procedimiento de instalación local utilizando dos parámetros:

-\$MYSITEROOT, el directorio donde se hará la instalación local y

-\$minervaCD, el directorio del sistema donde se encuentra montado el CD.

El archivo *minerva-software-CD.sh* primero usa el script *installLHCB.sh*, este utilizara a su vez los scripts *install_project.py* y *lhcbSetup.sh* para realizar la instalación y configuración de los paquetes necesarios del framework Gaudi/LHCB, los cuales son copiado, descomprimidos y desempaquetados de los directorios en */lhcbproject/dist* dentro CD.

Luego, *minerva-installer-CD.sh* usa el script *install.sh* del directorio *install/* del CD para construir la capa intermedia WRIGHT y la capa del software MINERνA. *install.sh* utiliza los script *installWright.sh* y *installMinerva.sh* para configurar y recompilar los paquetes de las capas Wright y Minerva respectivamente. Además, realiza el “tweak” que permitirá utilizar el compilador C version gcc32 en lugar de la versión del compilador por defecto del sistema.

install.sh Es el archivo de ordenes principal, toma las opciones del usuario, establece las variables, llama a sub-archivos (ver A.1.1).

installLHCb.sh Descarga el archivo *install_project.py* del LHCb, hace la instalación binaria del proyecto LHCb (ver A.1.2).

installWright.sh Descarga el archivo *wright*, construye el proyecto *wright*.

installMinerva.sh Descarga el archivo *minerva*, construye el proyecto *minerva* (ver A.1.3).

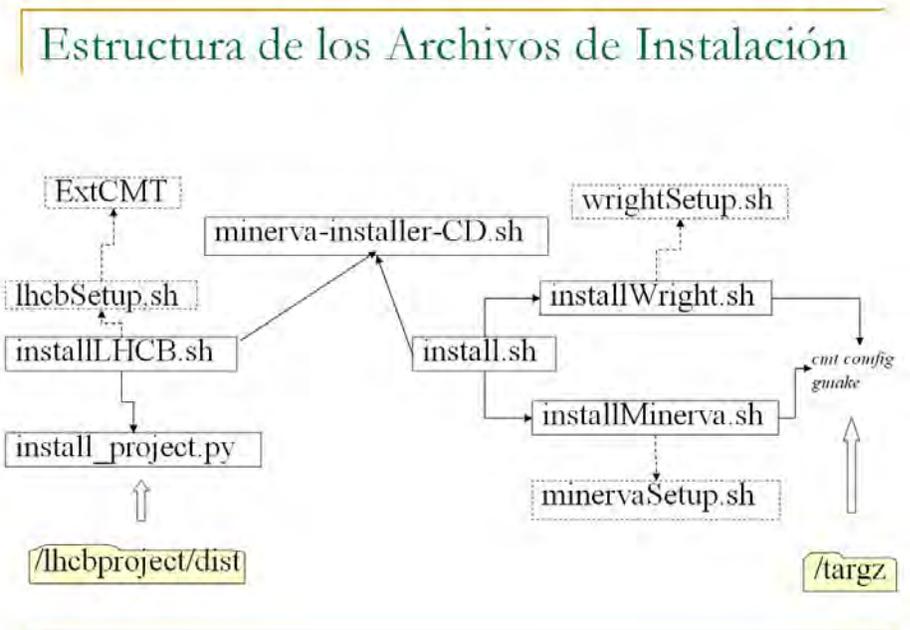


Figura 5.1: Estructura de los principales archivos de instalación

5.3. Configuración y uso del software MINER ν A

5.3.1. Variables de entorno

Las variables de entorno del software MINER ν A pueden ser establecidas usando el siguiente comando:

```
$ source <path_install_dir>/setup.sh <path_install_dir>
```

donde <path_install_dir> es el camino del directorio donde el software fue instalado.

Esto establece las principales variables de entorno, principalmente identificando directorios relevantes para trabajar con el software MINER ν A, y crea algunos alias, y realiza el establecimiento de la herramienta CMT (Configuration Management Tool), usado en MINER ν A para construir el software y para establecer otras variables de entorno.

Se debería ver una salida similar a la siguiente:

```
*****
*           WELCOME to the LHCb software           *
*****
— $SITEROOT is set to /home/adolfoch/minerva/sw
— $CMBSITE is set to LOCAL
— $CMTRoot is set to /home/adolfoch/minerva/sw/contrib/CMT/v1r16p20040901
— $CMTCONFIG is set to slc3_ia32_gcc323
— to compile and link in debug mode : export CMTCONFIG=$CMTDEB ; gmake
— $LHCbPROJECTPATH is set to $LHCb_release_area:$LCG_release_area
— projects will be searched in $CMTPROJECTPATH set by the user
```

5.3.2. Principales aplicaciones MINER ν A

Las principales aplicaciones del software MINER ν A son:

- MEGA : el programa de simulación del detector (usa la herramienta GEANT4 para simular el paso de las partículas a través del detector)
- VISTA : el programa de visualización del detector y los eventos (usa el software Panoramix del LHCb)
- MEGACHECK : el programa para leer los archivos de datos obtenidos del programa Mega (usa el sistema ROOT, cual es un framework para el desarrollo de aplicaciones de análisis de datos científicos a gran escala desarrollado por el CERN)

5.3.3. Uso de las aplicaciones MINER ν A

Ir al directorio de trabajo, por ejemplo

```
$ ls cd ~/cmtuser
```

Sesión MEGA

Estableciendo el entorno:

```
$ MegaEnv v2r0
$ source $MYSTEROOT/minerva/MEGA/MEGA_v2r0/Sim/Mega/v1r1/cmt/setup.sh
```

Se debería ver una salida similar a:

```
Setting Mega environment
——> Mega environment set for version v2r0 <——

——> packages searched for in
/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/MEGA/MEGA_v2r0:/home
/adolfoch/minerva/sw/minerva/MINERVA/MINERVA_v2r0:/home/adolfoch/minerva/sw/minerva
/PARAM:/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/DBASE:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/WRIGHT
/WRIGHT_v1r0:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/WEBER/WEBER_v1r0:/home/adolfoch/minerva
/sw/lhcb/GAUSS/GAUSS_v23r0:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb/GEANT4/GEANT4_v80r0:/home
/adolfoch/minerva/sw/lhcb/LHCB/LHCB_v19r3:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb/DBASE:/home
/adolfoch/minerva/sw/lhcb/GAUDI/GAUDI_v17r2:/home/adolfoch/minerva/sw/lcg/external
/LCGCMT/LCGCMT_38:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/DBASE <——
```

Estableciendo las opciones de trabajo y corriendo un trabajo estándar Mega

```
$ $MEGAROOT/slc3_ia32_gcc323/MegaMain.exe $MEGAROOT/options/Mega.opts
```

si todo va bien se debería ver una salida similar a esta:

```
...
ToolSvc.SequencerTime ... INFO GetPlaneHits | 0.000 |
10.429 | 0.684 20.2 | 2 | 0.021 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO GetTowerHits | 0.000 |
0.062 | 0.019 0.1 | 2 | 0.000 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO GiGaGetHitsAlg | 0.000 |
8.139 | 0.463 15.8 | 2 | 0.016 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO Monitor | 0.000 |
0.104 | 0.051 0.2 | 2 | 0.000 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO GenMonitor | 0.000 |
0.087 | 0.038 0.1 | 2 | 0.000 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO GenHistos | 0.000 |
```

```
0.075 | 0.029 0.1 | 2 | 0.000 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO SimMonitor | 0.000 |
0.011 | 0.007 0.0 | 2 | 0.000 |
ToolSvc.SequencerTime ... INFO
```

```
GiGa.GiGaMgr INFO GiGaRunManager:: GiGaRunManager Finalization
GiGa.GiGaMgr.GiGaSetS... DEBUG ==> Finalize the base class GaudiTool
GiGa.GiGaMgr.GiGaSetS... DEBUG Tools to release :
GiGa.GiGaMgr.GiGaSetS... DEBUG Services to release : GiGa
GiGa.GiGaMgr.GiGaSetS... DEBUG Releasing service 'GiGa'
ApplicationMgr INFO Application Manager Finalized successfully
```

Un trabajo estándar Mega produce tres archivos:

```
$ ls
MegaHistos.root Mega.sim NewCatalog.xml
```

El primer archivo contiene un conjunto de histogramas de monitoreo: se puede mirar y ver que hay en ellos con la herramienta ROOT. El segundo archivo contiene los datos del evento generado y simulado, mientras que el tercer archivo es un catálogo necesario si se quiere repetir la simulación

Se puede querer redireccionar la salida de Mega en un archivo log para ser capaz de mirar en este al final. Se puede hacer aquello tipeando:

```
$ $MEGAROOT/slc3_ia32_gcc323/MegaMain.exe $MEGAROOT/options/Mega.opts >&
TestMega.log
```

o escribir esto en la misma vez sobre un archivo y ver esto sobre la pantalla:

```
$ $MEGAROOT/slc3_ia32_gcc323/MegaMain.exe $MEGAROOT/options/Mega.opts | tee
TestMega.log
```

Sesión VISTA

Estableciendo el entorno:

```
$ VistaEnv v1r0
$ source $MYSITEROOT/minerva/VISTA/VISTA_v1r0/Vis/Vista/v1r0/cmt/setup.sh
```

Se deberá ver una salida similar a:

```
Setting Vista environment
—> Vista environment set for version v1r0 <—

—> packages searched for in
/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/VISTA/VISTA_v1r0:
/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/MINERVA/MINERVA_v1r0:/home/adolfoch/minerva/sw
/minerva/PARAM:/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/DBASE:/home/adolfoch/minerva/sw
/wright
/WRIGHT/WRIGHT_v1r0:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/SOVIS/SOVIS_v1r0:/home/adol
foch
/minerva/sw/lhcb/LHCB/LHCB_v19r3:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb/DBASE:/home/adol
foch
/minerva/sw/lhcb/GAUDI/GAUDI_v17r2:/home/adolfoch/minerva/sw/lcg/external/LCGCMT
/LCGCMT.38:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/DBASE:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb
/PANORAMIX/PANORAMIX_v12r0:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb/LBCOM/LBCOM_v3r2:/home
/adolfoch/minerva/sw/lhcb/REC/REC_v2r2 <—
```

y entonces corre tipeando

```
$ $VISTAROOT/slc3_ia32_gcc323/Vista.exe $VISTAROOT/options/MyVista.opts
```

se debería abrir el visualizador con una imagen como sigue:

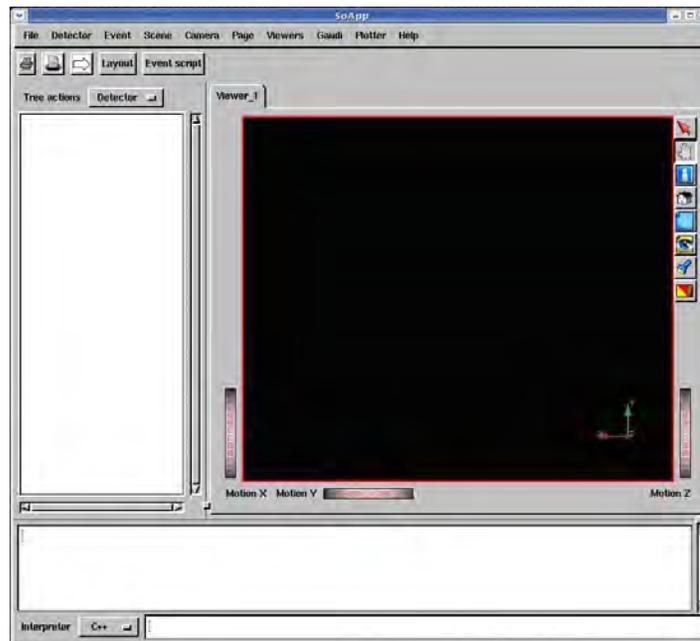


Figura 5.2: Sesión Vista: mostrará el detector y los eventos

Para ver la “Geometría del Detector”, haga click derecho sobre el árbol de acciones, y seleccione “Detector”, click sobre dd, click sobre Geometry, click sobre Minerva y click sobre lvMinerva. Entonces se podrá visualizar la geometría del detector.

Hay botones para controlar el zoom, funciones de rotación y traslación

Se debería ver una imagen como sigue:

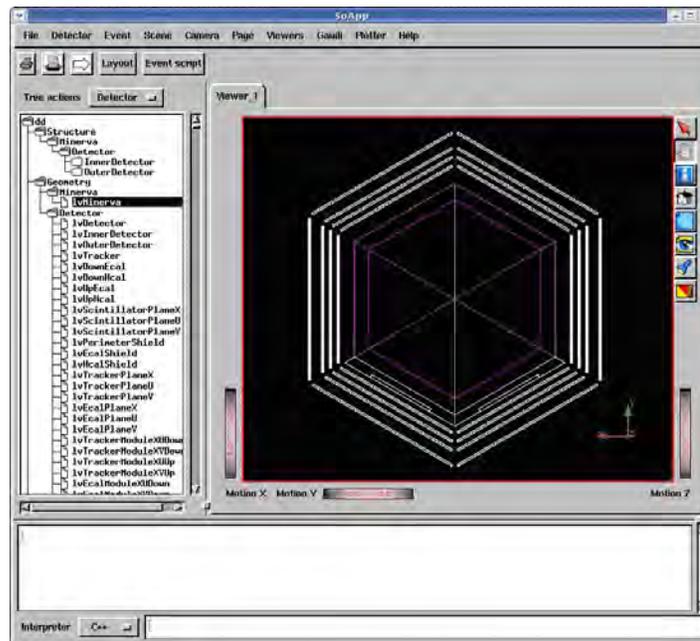


Figura 5.3: Sesión Vista: muestra el detector

Para ver los “eventos”, click sobre el botón “next event” click derecho sobre árbol de acciones, y seleccione “Event”, click sobre Gen and click sobre HepMCEvents; click sobre MC and click sobre Particles. Entonces se podrá vizualizar los eventos.

Se debería ver una imagen como sigue:

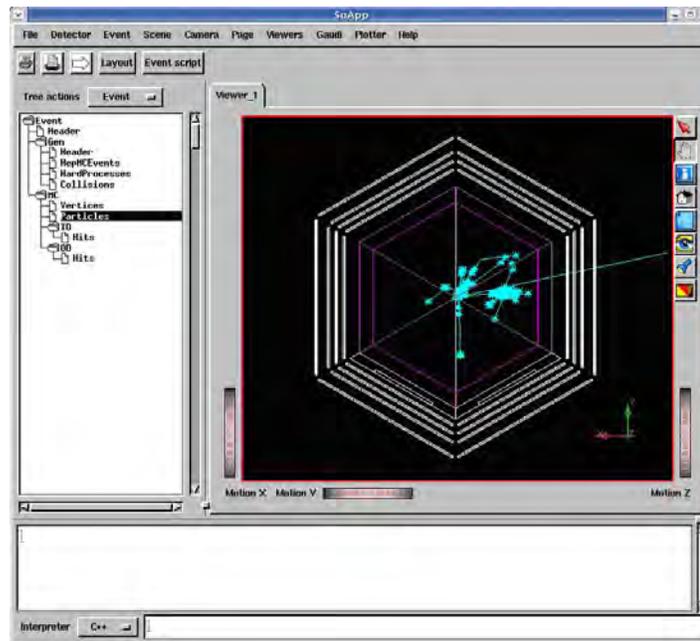
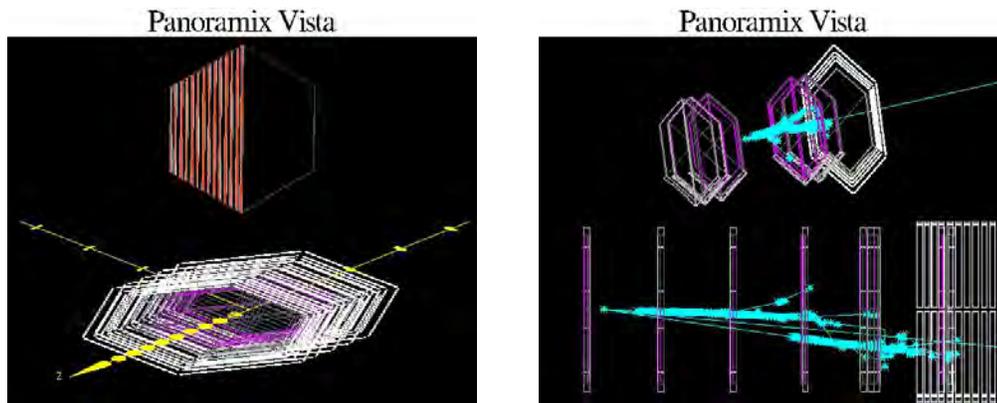


Figura 5.4: Sesión Vista: muestra el detector y el evento

Otras Vistas:



(a) (Arriba) Vista de un Plano Centelador del detector interno formado por stripts triangulares; (Abajo) Módulos del detector formados por Planos Centeladores rodeados del detector externo.

(b) Vista del evento de un Pion de 1GeV en los límites de las partes del detector: calorímetros Hadronicos, electromagnéticos, y tracker.

Figura 5.5: Sesiones Vista

Sesión MEGACHECK

Estableciendo el entorno:

```
$ MegaEnv v2r0
$ source $MYSITEROOT/minerva/MEGA/MEGA.v2r0/Sim/MegaCheck/v1r1/cmt/setup.sh
```

Se debería ver una salida similar a:

```
Setting Mega environment
——> Mega environment set for version v2r0 <——

——> packages searched for in
/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/MEGA/MEGA.v2r0:/home
/adolfoch/minerva/sw/minerva/MINERVA/MINERVA.v2r0:/home/adolfoch/minerva/sw/mine
rva
/PARAM:/home/adolfoch/minerva/sw/minerva/DBASE:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/
WRIGHT
/WRIGHT.v1r0:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/WEBER/WEBER.v1r0:/home/adolfoch/mi
nerva
/sw/lhcb/GAUSS/GAUSS.v23r0:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb/GEANT4/GEANT4.v80r0:/h
ome
/adolfoch/minerva/sw/lhcb/LHCB/LHCB.v19r3:/home/adolfoch/minerva/sw/lhcb/DBASE:/
home
/adolfoch/minerva/sw/lhcb/GAUDI/GAUDI.v17r2:/home/adolfoch/minerva/sw/lcg/extern
al
/LCGCMT/LCGCMT.38:/home/adolfoch/minerva/sw/wright/DBASE <——
```

Estableciendo las opciones de trabajo y corriendo un trabajo estándar MegaCheck

```
$ $MEGACHECKROOT/slc3-ia32-gcc323/MegaCheckApp.exe $MEGACHECKROOT/options/MegaCheck.opts
```

si todo va bien se debería ver una salida similar a esta:

```
...
*Br   13 :HitTime   : HitTime [NHits]/F                               *
*Entries :          2 : Total Size=      17963 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :          0 : Basket Size=     32000 bytes  Compression=    1.00   *
*.....*
*Br   14 :Eloss     : Eloss [NHits]/F                                 *
```

CAPÍTULO 5. EMPAQUETAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DEL SOFTWARE MINER ν A49

```

*Entries :      2 : Total Size=      17951 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   15 :HitPos      : HitPos[NHits][3]/F  *
*Entries :      2 : Total Size=      52579 bytes  File Size =      47665  *
*Baskets :      2 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.09  *
*.....*
*Br   16 :NHitsOD     : NHitsOD/I  *
*Entries :      2 : Total Size=         640 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   17 :Frame       : Frame[NHitsOD]/I  *
*Entries :      2 : Total Size=         724 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   18 :Tower       : Tower[NHitsOD]/I  *
*Entries :      2 : Total Size=         724 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   19 :Story       : Story[NHitsOD]/I  *
*Entries :      2 : Total Size=         724 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   20 :Bar         : Bar[NHitsOD]/I  *
*Entries :      2 : Total Size=         712 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   21 :HitTimeOD   : HitTimeOD[NHitsOD]/F  *
*Entries :      2 : Total Size=         755 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   22 :ElossOD     : ElossOD[NHitsOD]/F  *
*Entries :      2 : Total Size=         743 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*
*Br   23 :HitPosOD    : HitPosOD[NHitsOD][3]/F  *
*Entries :      2 : Total Size=         755 bytes  One basket in memory  *
*Baskets :      0 : Basket Size=      32000 bytes  Compression=    1.00  *
*.....*

```

```

NTupleSvc           INFO NTuples saved successfully
PoolRootTreeEvt...  INFO POOL conversion service PoolRootTreeEvtCnvSvc
successfully finalized.
PoolRootKeyEvtC...  INFO POOL conversion service PoolRootKeyEvtCnvSvc
successfully finalized.
PoolRootEvtCnvSvc   INFO POOL conversion service PoolRootEvtCnvSvc successfully
finalized.
ApplicationMgr       INFO Application Manager Finalized successfully
    
```

La salida estándar MegaCheck es un archivo root: Mega.ntp.root.

Algunos gráficos obtenidos:

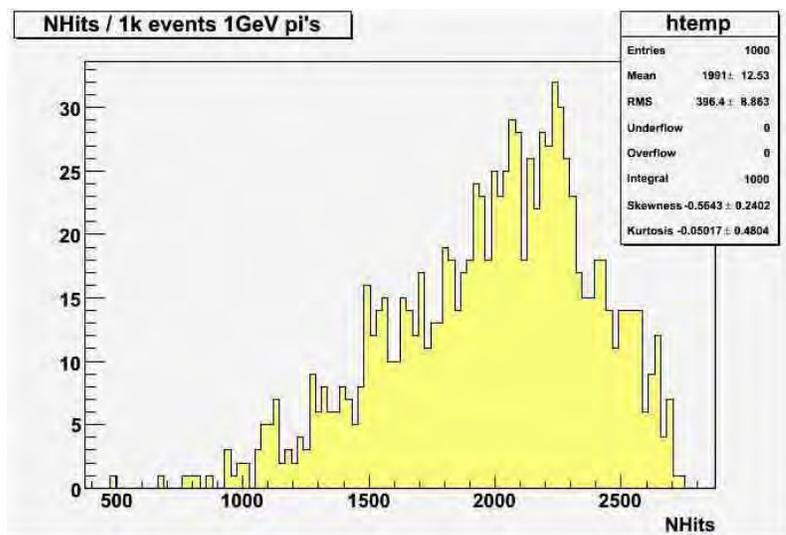


Figura 5.6: Histograma del Número de Hits en el detector interno. 1k de piones de 1GeV. El evento se produce en la coordenada (0,0) del detector.

Figura 5.7: Histograma de comparación del Número de Hits en el detector interno para 1k de eventos de electrones (rojo), muones (negro) y piones (verde).

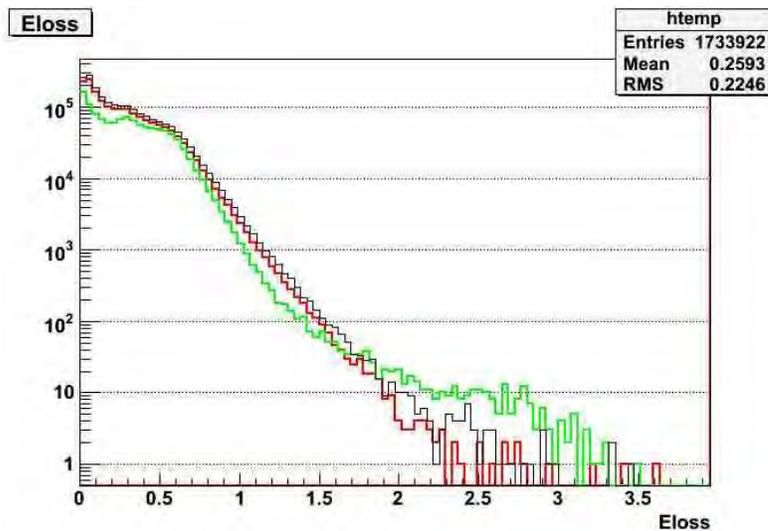
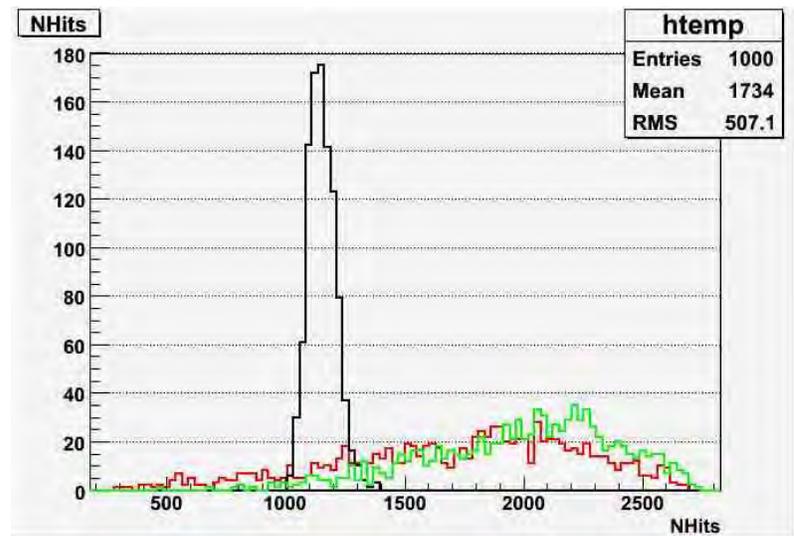
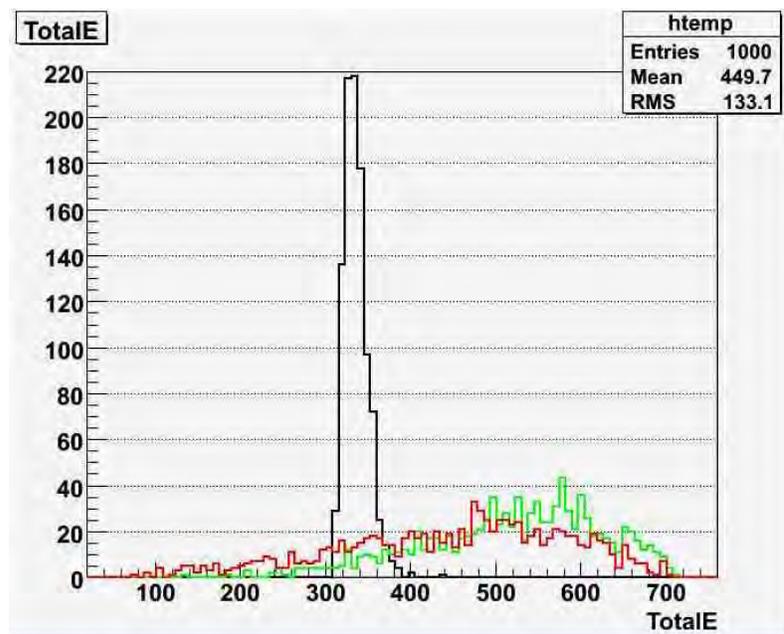


Figura 5.8: Histograma de la Energía Perdida por modulo del detector para 1k de eventos de electrones (rojo), muones (negro) y piones (verde).

Figura 5.9: Histograma de la Energía Total depositada para 1 K de eventos de electrones (rojo), muones (negro) y piones (verde).



5.4. Problemas resueltos utilizando el CD:

- No es necesario obtener acceso a los repositorios Minerva CVS en Fermilab para fijar una instalación inicial del software MINER ν A, por lo cual se evita el requerimiento de tener que kerberizar el sistema en el cual se va a instalar el software, que para maquinas localizadas fuera del Fermilab es un procedimiento que reportó varios problemas.
- La instalación no depende de ningún sitio Web externo de donde se requieran descargar los paquetes, tal como el sitio Web LHCb para los paquetes del software LHCb, ya que todos los paquetes necesarios han sido reempaquetados, comprimidos y colocados de manera apropiada dentro del CD. Así, ahora no se requiere tener ningún tipo de acceso a Internet para instalar el software MINER ν A.
- Para instalar el software sobre Scientific Linux 4 establecer se realiza un “tweak” o truco que se ejecuta durante el proceso de instalación usando el CD. De esta

manera, se crea un link simbólico de gcc a gcc32 en la carpeta \$HOME/bin del sistema local, y se establece esta ruta tal que el link es visible primero en la variable de entorno \$PATH. Este tweak puede ser usado para instalar el software en cualquier otro sistema Linux con compilador de C version gcc32.

- Usando el CD se optimiza el tiempo que se gasta al realizar una instalación local del software ya que esta no depende de la velocidad de conexión a Internet, todos los paquetes son descomprimidos y desempaquetados rápidamente del CD. Se pueden realizar múltiples instalaciones rápidamente y sin problemas que permiten también incrementar el tiempo dedicado para trabajar en el desarrollo del software.
- El CD permite incorporar nuevos paquetes desarrollados en el proceso de instalación: nuevas versiones de los paquetes, reemplazos, modificaciones, etc.
- El CD es además un tutorial de introducción para los nuevos usuarios del software MINERVA.

Capítulo 6

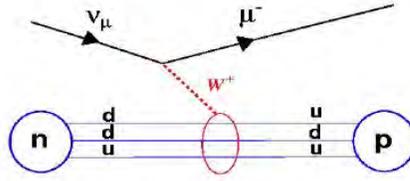
Análisis topológico de eventos QEL-CC

En este capítulo se realiza un análisis topológico de eventos simulados QEL-CC en el detector MINER ν A. Esto será útil para el reconocimiento y la identificación de eventos reales en el detector cuando sean observados y estudiados durante y luego de la adquisición de datos o adquisición de señales.

Topologías son esencialmente instantáneas de los sucesos en un evento y representan visualmente las manifestaciones físicas de las transformaciones de las partículas que se registran en el detector. Para cada tipo de evento, los neutrinos interactúan formando trayectorias específicas en determinados ángulos, lo que se usa justamente para identificar el evento.

6.1. Simulación de eventos QEL-CC

En este tipo de eventos (cuasielástico mediado por corriente cargada) el neutrino interactúa con el neutrón de un núcleo de los blancos del detector produciendo un muón y un protón. La interacción se realiza por intercambio de un bosón W^+ .

Figura 6.1: $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$

6.1.1. Generación de eventos QEL-CC usando GENIE

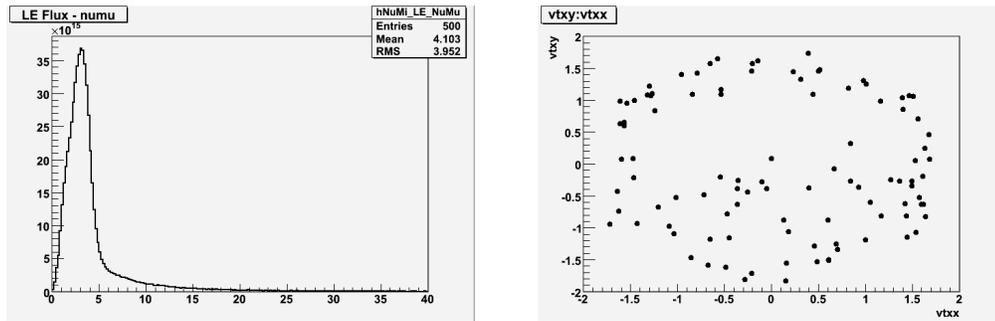
Para simular la producción de eventos de neutrinos en el detector MINER ν A se utiliza el generador GENIE (Generates Events for Neutrino Interaction Experiments). GENIE es un sistema de software de gran escala, consiste de 120000 líneas de código C++, con un moderno diseño orientado a objetos y un contenido de Física ampliamente validado.

Para el experimento MINER ν A GENIE usa el espectro de energías del rayo NuMI para la energía del neutrino y la geometría de detector MINER ν A para la posición de los blancos. Para realizar esta simulación se utilizó el archivo de ordenes `genie_minerva_NuMI_LE_QEL-CC.sh` (ver A.2.1) disponible en el paquete SystemTest de la versión v6r2 del software MINER ν A.

Comandos para ejecutar el archivo de ordenes dentro del paquete SystemTest:

```
$ cd SystemTests/v6r2/cmt/
$ source setup.sh
$ cd ..
$ source options/GENIE/genie_minerva_NuMI_LE_QEL-CC.sh
```

Esto genera 100 eventos cuasielásticos a bajas energías en el detector MINER ν A. La salida (resultado) son 2 archivos `.root`, el primero contiene objetos GHEP (objetos GENIE) y el otro, que es el importante, es una n-tupla cuyos datos se utilizan para procesar la simulación de la respuesta de detector con el paquete MEGA (GEANT4).



(a) Distribución de energías del flujo NuMI - configuración LE

(b) Posición (x,y) de los vértices de interacción en el detector

Figura 6.2: Histograma de las energías disponibles para la simulación de las interacciones y posición de las interacciones primarias en el detector MINERνA

Estudio del evento cuasielástico simulado con GENIE: $\nu_\mu + Fe56$

En esta parte se realiza el seguimiento detallado de unos de los eventos cuasielásticos simulados anteriormente con GENIE. En el evento escogido, un neutrino muónico ν_μ interactúa con un núcleo de $Fe56$ perteneciente a uno de los blancos del detector.

El proceso de interacción simulado se puede entender observando la siguiente tabla:

```
1282205127 NOTICE gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (476)> : *** Generating event..... 7
1282205127 INFO gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (511)> : Generated event:
```

Idx	Name	Ist	PDG	Mother	Daughter	Px	Py	Pz	E		
0	nu_mu	0	14	-1	-1	4	4	0.000	0.000	1.737	1.737
1	Fe56	0	1000260560	-1	-1	2	3	0.000	0.000	0.000	52.103
2	neutron	13	2112	1	-1	5	5	-0.146	-0.122	-0.120	0.931
3	Fe55	2	1000260550	1	-1	7	7	0.146	0.122	0.120	51.172
4	mu-	1	13	0	-1	-1	-1	0.451	-0.693	0.903	1.229
5	proton	14	2212	2	-1	6	6	-0.596	0.571	0.714	1.439
6	proton	1	2212	5	-1	-1	-1	-0.607	0.597	0.604	1.403
7	HadrBlob	1	2000000002	3	-1	-1	-1	0.184	0.069	0.202	51.172
8	NucBindE	1	2000000101	-1	-1	-1	-1	-0.028	0.027	0.028	0.036

Fin-Init: | | | | -0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Vertex: | nu_mu @ (x = -0.14256 m, y = 1.61712 m, z = -1.12933 m, t = 6.2396E

Se observa que las partículas existentes en el estado inicial de la interacción, neutrino y núcleo $Fe56$, son etiquetadas por GENIE con el código de estado Ist=0.

El neutrino incidente golpea el núcleo de $Fe56$, dividiéndolo en un neutrón y un

núcleo $Fe55$. En este punto, el neutrón se encuentra aún en el entorno nuclear (Ist=22):

```
1282205127 NOTICE gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (476)> : *** Generating event
1282205127 INFO gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (511)> : Generated event:
```

```
-----
GENIE GHEP Event Record [shown using $GHEPPRINTLEVEL = 1]
-----
```

Idx	Name	Ist	PDG	Mother	Daughter	Px	Py
0	nu_mu	0	14	-1	-1	4	4
1	Fe56	0	1000260560	-1	-1	2	3
2	neutron	11	2112	1	-1	5	5
3	Fe55	2	1000260550	1	-1	7	7
4	mu-	1	13	0	-1	-1	-1
5	proton	14	2212	2	-1	6	6
6	proton	1	2212	5	-1	-1	-1
7	HadrBlob	1	2000000002	3	-1	-1	-1
8	NucBindE	1	2000000101	-1	-1	-1	-1

```
-----
Fin-Init:| | | | | | -0.000 | 0.000 |
-----
Vertex: | | nu_mu @ (x = -0.14256 m, y = 1.61712 m, z = -1.12933 m)
-----
```

A causa de la interacción, el neutrino muonico se transforma en un muón ($\nu_\mu \rightarrow \mu_-$):

```
1282205127 NOTICE gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (476)> : *** Gener
1282205127 INFO gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (511)> : Generated ev
```

```
-----
GENIE GHEP Event Record [shown using $GHEPPRINTLEVEL = 1]
-----
```

Idx	Name	Ist	PDG	Mother	Daughter	Px	Py
0	nu_mu	0	14	-1	-1	4	4
1	Fe56	0	1000260560	-1	-1	2	3
2	neutron	11	2112	1	-1	5	5
3	Fe55	2	1000260550	1	-1	7	7
4	mu-	1	13	0	-1	-1	-1
5	proton	14	2212	2	-1	6	6
6	proton	1	2212	5	-1	-1	-1
7	HadrBlob	1	2000000002	3	-1	-1	-1
8	NucBindE	1	2000000101	-1	-1	-1	-1

```
-----
Fin-Init:| | | | | | -0.000 | 0.000 |
-----
Vertex: | | nu_mu @ (x = -0.14256 m, y = 1.61712 m, z = -1.12933 m)
-----
```

Además, el neutrón golpeado decae, dentro del entorno nuclear, produciéndose un protón. Luego, GENIE simula el transporte de este protón, a través del entorno nuclear (transporte hadrónico intranuclear), fuera del núcleo, para considerar alguna posible reinteracción o resonancia. En este evento, como se observa, no se produce resonancia:

```
1282205127 NOTICE gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (476)> : *** Generating
1282205127 INFO gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (511)> : Generated event:
```

GENIE GHEP Event Record [shown using \$GHEPPRINTLEVEL = 1]										
Idx	Name	Ist	PDG	Mother	Daughter	Px	Py			
0	nu_mu	0	14	-1	-1	4	4	0.000	0.000	
1	Fe56	0	1000260560	-1	-1	2	3	0.000	0.000	
2	neutron	11	2112	1	-1	5	5	-0.146	-0.122	
3	Fe55	2	1000260550	1	-1	7	7	0.146	0.122	
4	mu-	1	13	0	-1	-1	-1	0.451	-0.693	
5	proton	14	2212	2	-1	6	6	-0.596	0.571	
6	proton	1	2212	5	-1	-1	-1	-0.607	0.597	
7	HadrBlob	1	2000000002	3	-1	-1	-1	0.184	0.069	
8	NucBindE	1	2000000101	-1	-1	-1	-1	-0.028	0.027	
Fin-Init:								-0.000	0.000	
Vertex:		nu_mu @ (x = -0.14256 m, y = 1.61712 m, z = -1.1293								

En esta tabla, HadrBlob hace referencia al núcleo remanente luego de la interacción y NucBindE viene a ser la energía de enlace nuclear disipada.

Las partículas del estado final, muón y protón (Ist=1), son utilizadas luego para la simulación de la detección usando GEANT4.

```
1282205127 NOTICE gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (476)> : *** Generating event..... 7
1282205127 INFO gNuMIevgen : [n] <gNuMIExptEvGen.cxx::main (511)> : Generated event:
```

GENIE GHEP Event Record [shown using \$GHEPPRINTLEVEL = 1]												
Idx	Name	Ist	PDG	Mother	Daughter	Px	Py	Pz	E			
0	nu_mu	0	14	-1	-1	4	4	0.000	0.000	1.737	1.737	
1	Fe56	0	1000260560	-1	-1	2	3	0.000	0.000	0.000	52.103	
2	neutron	11	2112	1	-1	5	5	-0.146	-0.122	-0.120	0.931	
3	Fe55	2	1000260550	1	-1	7	7	0.146	0.122	0.120	51.172	
4	mu-	1	13	0	-1	-1	-1	0.451	-0.693	0.903	1.229	
5	proton	14	2212	2	-1	6	6	-0.596	0.571	0.714	1.439	
6	proton	1	2212	5	-1	-1	-1	-0.607	0.597	0.604	1.403	
7	HadrBlob	1	2000000002	3	-1	-1	-1	0.184	0.069	0.202	51.172	
8	NucBindE	1	2000000101	-1	-1	-1	-1	-0.028	0.027	0.028	0.036	
Fin-Init:								-0.000	0.000	0.000	0.000	
Vertex:		nu_mu @ (x = -0.14256 m, y = 1.61712 m, z = -1.12933 m, t = 6.23968										

Estado Final

6.2. Simulación usando Mega (GEANT4) del paso de las partículas del estado final GENIE a través del detector MINER ν A

Para simular la propagación de las partículas del estado final GENIE a través del detector MINER ν A se utilizó el archivo de ordenes Mega-Minerva-NuMI.opts (ver A.2.2).

Esta simulación utiliza las partículas del estado final de la interacción generada por GENIE y la geometría del detector MINER ν A. En La Fig. 6.3 se muestra los patrones de este tipo de evento en el detector MINER ν A.

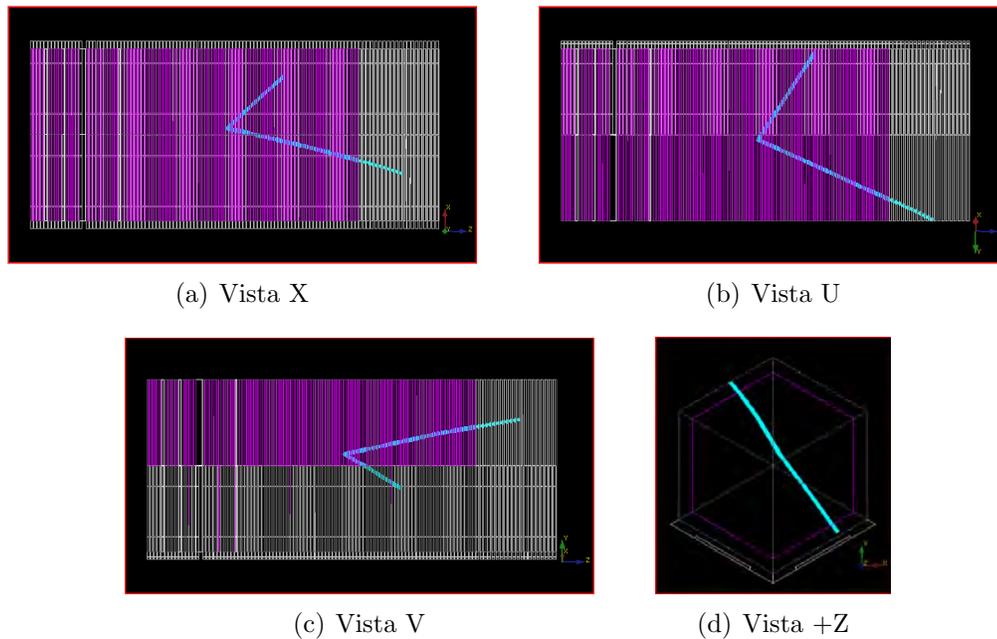


Figura 6.3: Patrones de un evento cuasielástico en el detector MINER ν A

Capítulo 7

Identificación de eventos reales QEL-CC

En este capítulo se presenta una metodología desarrollada para filtrar eventos reales QEL-CC a partir del análisis de datos de eventos simulados. Luego, se presenta un análisis que permite identificar las partículas producidas en el evento QEL-CC: muón, protón.

7.1. Análisis de eventos simulados QEL-CC

Para llevar a cabo este estudio, se simulan 2674 eventos QEL-CC con el software MINER ν A. Estos eventos luego son reconstruidos usando el algoritmo de reconstrucción de datos del software (DST v7r7).

Como primer objetivo se busca conocer en los datos reconstruidos cual es el porcentaje de eventos QEL-CC que tienen asociado 2 tracks a un vértice. Para este propósito se creó un algoritmo en ROOT que grafica un histograma del número de tracks o trayectorias asociados a cada vértice. Este algoritmo (ver A.3.1) usa un bucle para buscar sobre el total de eventos, y usa en cada evento otro bucle sobre el número de vértices en el evento para determinar el número de trayectorias asociadas al vértice. La información

se presenta graficando un histograma.

Variable DST:

```
Int_t   vtx_n_tracks[n_vertices];
```

Esta variable es un arreglo de enteros de longitud igual al numero de vértices reconocidos en un evento.

Histograma:

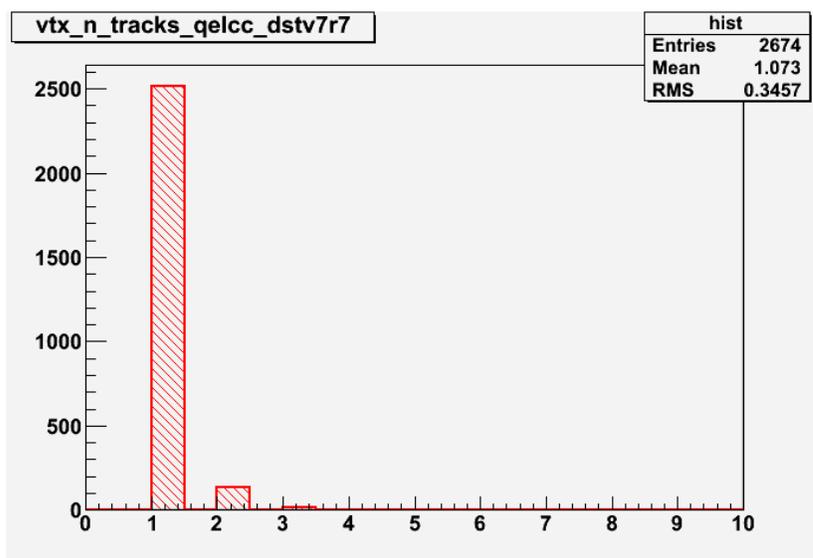


Figura 7.1: Histograma del número de tracks asociados con un vértice

Información completa del histograma:

Se observa que hay una gran cantidad (2517) de eventos (vértices) que cuentan con solo 1 track, y hay 134 eventos con 2 tracks, hay 15 eventos con 3 tracks, 3 eventos con 4 tracks, 4 eventos con 5 tracks, y 1 evento con 8 tracks. El porcentaje de eventos con 2 tracks es aproximadamente el 5% del total de eventos registrados.

```
root [0] .L analisis_SIM_QELCC_DSTv7r7.C
root [1] analisis_SIM_QELCC_DSTv7r7 t
root [2] t.vtx_n_tracks()
<TCanvas::MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1
TH1.Print Name = hist , Entries= 2674, Total sum= 2674
```

```

fSumw[0]=0, x=-0.25
fSumw[1]=0, x=0.25
fSumw[2]=0, x=0.75
fSumw[3]=2517, x=1.25
fSumw[4]=0, x=1.75
fSumw[5]=134, x=2.25 // <- 134 v'ertices con 2 trayectorias asociadas
fSumw[6]=0, x=2.75
fSumw[7]=15, x=3.25
fSumw[8]=0, x=3.75
fSumw[9]=3, x=4.25
fSumw[10]=0, x=4.75
fSumw[11]=4, x=5.25
fSumw[12]=0, x=5.75
fSumw[13]=0, x=6.25
fSumw[14]=0, x=6.75
fSumw[15]=0, x=7.25
fSumw[16]=0, x=7.75
fSumw[17]=1, x=8.25
fSumw[18]=0, x=8.75
fSumw[19]=0, x=9.25
fSumw[20]=0, x=9.75
fSumw[21]=0, x=10.25
root [3]

```

Suma de ángulos azimutales

Por conservación del momento lineal, las trayectorias rectilíneas de la partícula incidente y las partículas creadas deben encontrarse sobre un mismo plano, llamado plano de interacción. Por tanto, en el sistema de coordenadas del detector MINER ν A, se debe cumplir que la suma de los valores absolutos de los ángulos azimutales de las trayectorias de las partículas creadas debe ser igual a 180 grados o π radianes.

Para determinar un rango del valor experimental de esta suma a partir de las trayectorias reconstruidas de un evento, se diseñó el siguiente algoritmo: Se ejecuta un búsqueda sobre los vértices encontrados en cada evento, si el vértice tiene 2 tracks asociados

se registra la suma de los valores absolutos de los ángulos azimutales de los tracks. Se grafica un histograma e imprime la información del histograma (ver A.3.2).

Histograma:

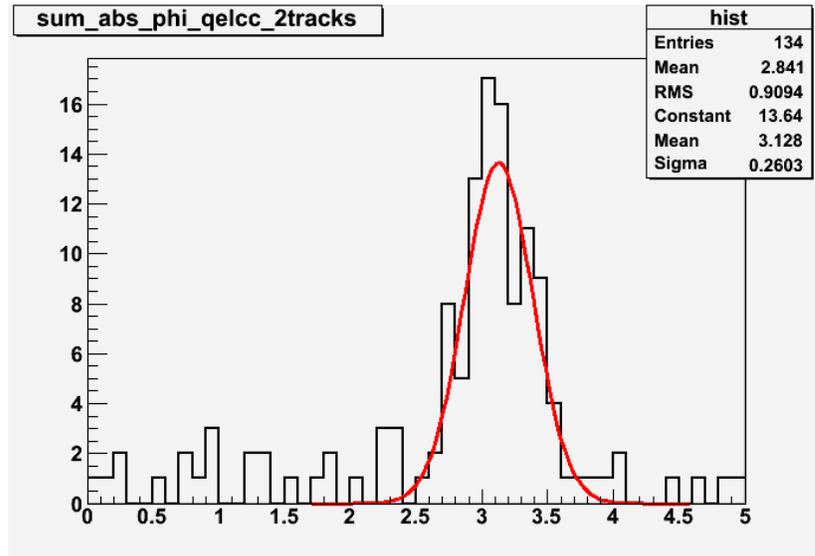


Figura 7.2: Histograma de la suma de ángulos azimutales

Luego, dado que las diferencias observadas corresponden a fluctuaciones en la medida, se ajusta el histograma a una campana de Gauss.

Para ajustar el histograma a una distribución de Gauss se utiliza el programa ROOT, esto se hace por el método de los mínimos cuadrados.

Resultados del ajuste:

```

root [3] FCN=22.4586 FROM MIGRAD STATUS=CONVERGED 43 CALLS 44 TOTAL
          EDM=4.87284e-12 STRATEGY= 1 ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER                               STEP          FIRST
NO.  NAME      VALUE              ERROR            SIZE    DERIVATIVE
  1  Constant   1.36424e+01   1.90813e+00   3.42877e-03  -1.92649e-06
  2  Mean       3.12773e+00   2.81491e-02   6.65417e-05  -6.55706e-06
  3  Sigma      2.60325e-01   2.44749e-02   2.90255e-05  -6.23535e-05
    
```

root [3]

De manera que, la función gaussiana está dada por:

$$f(x) = 13,64e^{-0,5\left(\frac{x-3,13}{0,26}\right)^2} \quad (7.1)$$

donde 3,13 (π) es la media \bar{x} , y 0.26 la desviación estándar σ .

Por tanto, una medida experimental de la suma de los ángulos azimutales, tiene una probabilidad del 68,26 % de estar incluida en el intervalo $\bar{x} \pm \sigma$, una probabilidad del 95,44 % de estar incluida en el intervalo $\bar{x} \pm 2\sigma$, y una probabilidad del 99,74 % de estar incluida en el intervalo $\bar{x} \pm 3\sigma$.

7.2. Filtrado de Eventos reales QEL-CC

Criterios de filtrado

Las condiciones que deben cumplir los vértices de un evento real QEL-CC seleccionado son:

1. Deben tener 2 trayectorias asociadas, y
2. Estar fuera de la región de los calorímetros (posición Z del vértice $\leq 8590,07$ mm)
3. Además, de acuerdo con el estudio anterior de los datos simulados, la suma de los valores absolutos de los ángulos azimutales de las trayectorias debe estar, con un 99.74 % de probabilidad, en el intervalo [2, 35 ; 3, 91].

Sub-detectores MINER ν A: Diagrama Posición Z de planos:

id = 1562902528; det = 1; subdet = 3; module = 82; plane = 2	z = 8499.61mm
id = 1563688960; det = 1; subdet = 3; module = 83; plane = 1	z = 8524.19mm
id = 1563951104; det = 1; subdet = 3; module = 83; plane = 2	z = 8544.84mm
id = 1564737536; det = 1; subdet = 3; module = 84; plane = 1	z = 8569.42mm
id = 1564999680; det = 1; subdet = 3; module = 84; plane = 2	z = 8590.07mm
id = 1700003840; det = 1; subdet = 4; module = 85; plane = 1	z = 8614.65mm

```

id = 1700265984; det = 1; subdet = 4; module = 85; plane = 2   z = 8635.3mm
id = 1701052416; det = 1; subdet = 4; module = 86; plane = 1   z = 8659.46mm
id = 1701314560; det = 1; subdet = 4; module = 86; plane = 2   z = 8680.1mm
id = 1702100992; det = 1; subdet = 4; module = 87; plane = 1   z = 8704.26mm

```

Se creó un script (ver A.3.3) utilizando los criterios antes mencionados, donde se usa la clase TChain de ROOT para seleccionar los posibles eventos QEL-CC a partir de una lista de datos reales obtenidos con el detector MINER ν A.

Se utilizó 21 DSTs Minerva de datos reales, donde cada DST contiene 1500 entradas, haciendo un total de 31500 entradas.

Resultados:

El script filtra 229 entradas donde se registran las señales de 229 posibles eventos QEL-CC.

```

[adolfoch@localhost MV]\$ root -l ev_QEL_filt.root
root [0]
Attaching file ev_QEL_filt.root as _file0...
root [1] minerva->Print()
*****
*Tree      :minerva      : minerva                                     *
*Entries   :      229   : Total =      181306018 bytes   File Size =   42726839 *
*          :          : Tree compression factor =    4.25                       *
*****

```

7.3. Identificación de partículas

En esta parte, se analizan los perfiles de pérdida de energía y el poder de frenado del detector MINER ν A sobre las partículas producidas en un evento filtrado QEL-CC, lo que permite identificarlos.

El *poder de frenado* se define como la cantidad de energía depositada por una partícula cargada en un medio material por unidad de longitud (en este caso los planos

módulos del detector MINER ν A):

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (7.2)$$

La forma explícita del poder de frenado fue determinada por Bethe-Bloch [53] el año 1932:

$$S(E) = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right] \quad (7.3)$$

donde

$$\beta = v/c$$

v = velocidad de la partícula

E = energía de la partícula

x = distancia atravesada por la partícula

c = velocidad de la luz

ze = carga de la partícula

e = carga del electrón

m_e = masa en reposo del electrón

n = densidad del detector

I = potencial de ionización medio del detector

La fuerte dependencia del poder de frenado con la masa de la partícula (a través de $T = \frac{1}{2}m c^2 \beta^2$) y la carga del mismo (ze) hace que partículas pesadas (en este caso el protón) se frenen con mayor facilidad que partículas ligeras (como el muón). Consecuentemente, la distancia recorrida por el protón será mucho menor que la recorrida por el muón en el detector MINER ν A.

Para realizar estos análisis, se crea un script ROOT (ver A.3.4) que permite visu-

alizar los eventos y analizar los perfiles de pérdida de energía y el poder de frenado.

Este script tiene 4 funciones:

EventDisplay() Permite presentar la información recogida mediante proyecciones X, U y V del evento, con detalle de la cantidad de PE detectados por Strip y por Modulo.

Gtrayect() Grafica las proyecciones ZX, ZY y XY de las trayectorias (utiliza la información de los nodos).

PEsNodo() Grafica PE vs Nodo para cada trayectoria del evento QEL.

PEsMod() Grafica PE vs Modulo para cada trayectoria del evento QEL (los gráficos son el perfil de pérdida de energía de las partículas producidas).

Los gráficos en la Figura 7.3 muestran el evento desde las vista X, U, y V del detector. Los pequeños rectangulos coloreados son llamados *hits*, el color de un hit esta determinado por su energía. Las líneas rectas en los gráficos de la Figura 7.4 son llamados *tracks*, los tracks son creados por las particulas que viajan a través del detector.

Los histogramas en las Figuras 7.5 y 7.6 muestran la energía depositada por nodo y por módulo en el detector dejado por las partículas producidas en el evento QEL-CC. La energía es mostrada en PE (fotoelectrones). El perfil rojo debe corresponder a la partícula más pesada, el protón, cual ha sido frenado con mayor facilidad; mientras que el perfil azul debe corresponder a la partícula más ligera, el muón.

Luego se puede utilizar la herramienta *dEdXTool* [72] para realizar un ajuste de los datos experimentales de frenado, con los perfiles teóricos para un tipo de partícula (p.ej. protón) y diferentes momentos, tal que el perfil que mejor se ajusta (usando el test Chi-cuadrado) permite identificar el tipo de partícula y su momento, como se observa en los gráficos de las figuras 7.7 y 7.8.

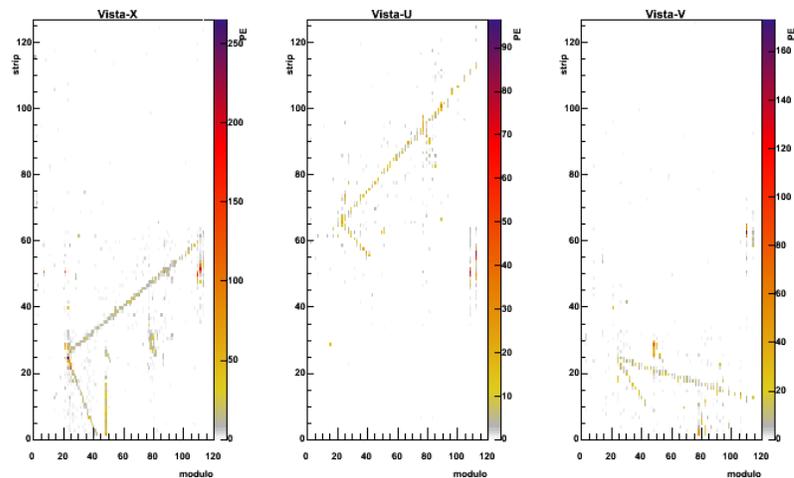


Figura 7.3: Display de un evento filtrado QEL desde las vistas X, U, y V del detector MINER ν A

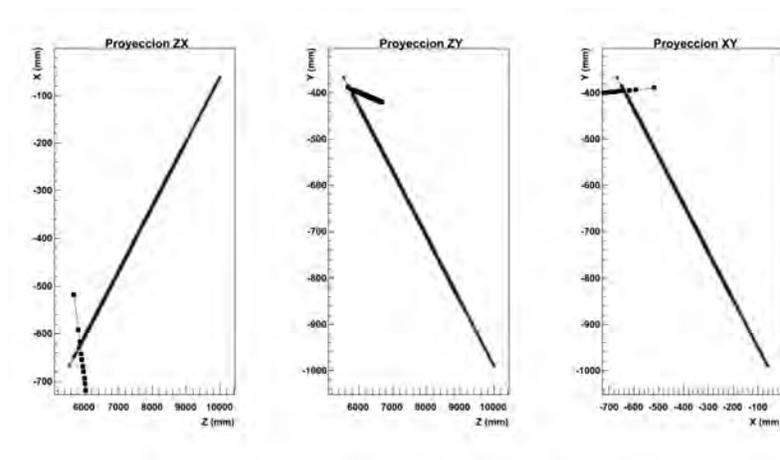


Figura 7.4: Trayectorias (tracks) de las 2 partículas producidas en el evento QEL-CC

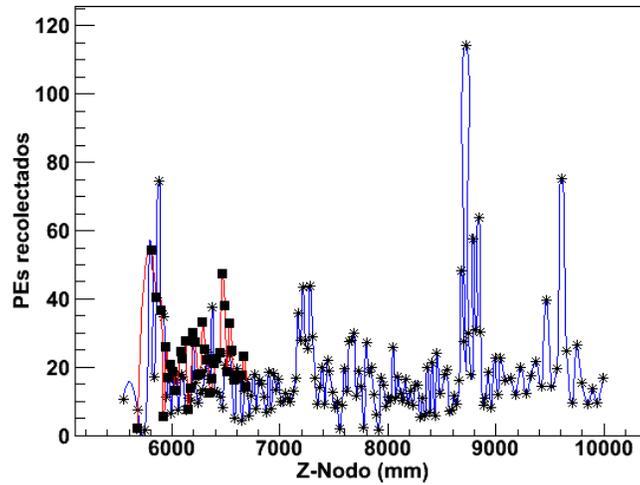


Figura 7.5: PEs recolectados en cada nodo del detector debido al paso de las 2 partículas producidas en el evento QEL-CC

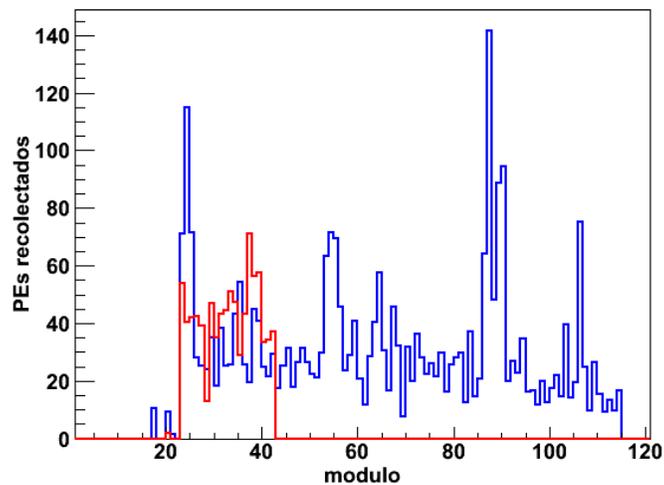


Figura 7.6: PEs recolectados en cada módulo (perfiles de pérdida de energía) para las 2 trayectorias del evento QEL-CC: el perfil rojo corresponde al protón, que ha sido frenado con mayor facilidad, y el perfil azul corresponde al muón, partícula más ligera

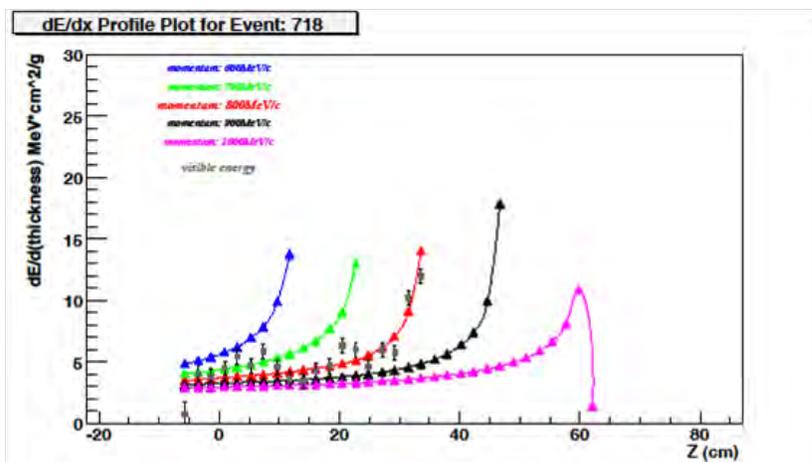


Figura 7.7: Perfiles dEdx para diferentes momentos

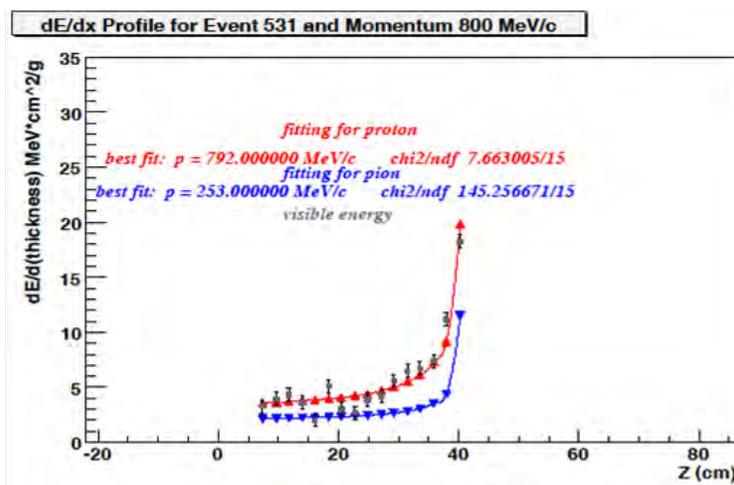


Figura 7.8: Discriminación de protón y pión

Capítulo 8

Conclusiones

- Se ha desarrollado y optimizado el software para controlar el movimiento de las fuentes radiactivas (Cs-137) utilizadas para mapear los módulos del detector. El proceso de mapeo es muy importante ya que permite identificar cualquier irregularidad en cada tira centelladora que luego afecta el rendimiento del plano respectivo, afectando por lo tanto el rendimiento del detector como un todo.
- Se ha creado un CD de instalación del software $\text{MINER}\nu\text{A}$ que permite facilitar el empaquetamiento, la distribución y el desarrollo del mismo en los diferentes centros de investigación que colaboran con el experimento. Tal como ha sucedido en el Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF, Brasil) y en la Facultad de Ciencias de la UNI.
- Se ha simulado la ocurrencia de eventos cuasielásticos de corriente cargada (QEL-CC) en el detector $\text{MINER}\nu\text{A}$, usando GENIE para simular la interacción neutrino-núcleo y GEANT4 para simular el paso de las partículas producidas a través del detector. Se han determinado los patrones de estos eventos en el detector, lo cual ha sido útil en el reconocimiento e identificación de eventos reales de ese tipo.
- Se ha desarrollado una metodología para filtrar eventos cuasielásticos reales obtenidos

en el detector MINER ν A a partir del análisis de datos de eventos simulados. Este procedimiento ha sido aplicado a datos reales obtenidos con el detector. Además, se han creado un conjunto de herramientas que permiten identificar mediante el perfil de pérdida de energía las partículas producidas en el evento QEL-CC, muón y protón.

- Los resultados de estos trabajos han contribuido significativamente en las publicaciones de Medidas de la Sección de Interacción de Neutrinos y Antineutrinos en el detector MINER ν A [1, 2].

Apéndice A

Scripts

En esta parte se incluyen todos los scripts utilizados en las diferentes simulaciones, y los scripts usados para obtener los resultados.

A.1. Scripts de instalación:

A.1.1. install.sh

```
#!/bin/sh
#
# Script to do clean installation of Gaudi, and LHCb software.
#
# The script takes two optional arguments:
#     the location for the installation; defaults to current directory
#     the platform; defaults to slc3_ia32_gcc323
#
export gaudi_version="v19r5"
export panoramix_version="v15r8"
export gauss_version="v30r5"
export lhcb_version="v22r10"
export wright_version="v1r0"
export weber_version="v2r0"
#
# Define environment variables
```

```

#
if [ $# -gt 1 ]; then
    export MYSITEROOT=$1
    export CMTCONFIG=$2
else
    if [ $# -eq 1 ]; then
        export MYSITEROOT=$1
        export CMTCONFIG="slc4_ia32_gcc34"
    else
        export MYSITEROOT='pwd'
        export CMTCONFIG="slc4_ia32_gcc34"
    fi
fi
#
# Do LHCb install
#
source ${MYSITEROOT}/install/installLHCb.sh

#
# Do Wright install
#
#source ${MYSITEROOT}/install/installWright.sh

#
# Do Minerva install
#
source ${MYSITEROOT}/install/installMinerva.sh

#
# Put setup script link in top directory for convenience
#
ln -sf ${MYSITEROOT}/setup/setupSw.sh ${MYSITEROOT}/setup.sh

```

A.1.2. installLHCb.sh

```

#!/bin/sh
#
# Script to do clean installation of Gaudi, and LHCb software.

```

```

#
#
# create the needed directories for the installation script
#
mkdir -p ${MYSITEROOT}/scripts/python

#
# grab the LHCb installation script off the web
#
cd ${MYSITEROOT}/scripts/python
wget http://lhcbproject.web.cern.ch/lhcbproject/dist/install_project.py

#
# invoke the LHCb installation and do a binary installation of GAUDI
#
cd ${MYSITEROOT}

#
# do a binary install of the LHCb visualization and simulation applications
#
python scripts/python/install_project.py -p Panoramix -v ${panoramix_version} -b
python scripts/python/install_project.py -p Gauss -v ${gauss_version} -b
#
#
# environment
#
source ${MYSITEROOT}/setup/lhcbSetup.sh

```

A.1.3. installMinerva.sh

```

#!/bin/sh
#
# Script to do clean installation of Minerva-specific packages.
#
# create the needed directories for the installation script
#
mkdir -p ${MYSITEROOT}/minerva
mkdir -p ${MYSITEROOT}/wright

```

```

cd ${MYSITEROOT}/minerva
export CVSROOT="minervacvs@cdcvs.fnal.gov:/cvs/minervasw"

cvs co MinervaScripts
#
# environment
#
source ${MYSITEROOT}/setup/lhcbSetup.sh
source ${MYSITEROOT}/setup/wrightSetup.sh
source ${MYSITEROOT}/setup/minervaSetup.sh

#
# MDBASE Installation
#
cvs co -r ${minervamdb_version} MDBASE
#
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva/MDBASE
getpack Det/MinervaDDDB ${minervadb_version}
cd Det/MinervaDDDB/${minervadb_version}/cmt
make
#
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva/MDBASE
getpack Det/MinervaXmlConditions ${minervaxmlcond_version}
cd Det/MinervaXmlConditions/${minervaxmlcond_version}/cmt
make
#
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva/MDBASE
getpack Det/MinervaSQLDDDB ${minervasqlddb_version}
cd Det/MinervaSQLDDDB/${minervasqlddb_version}/cmt
make
#
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva/MDBASE
getpack MinosFieldMap ${minervafieldmap_version}

#

```

```

# now do the real install
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva
python ${MINERVAPYTHON}/mkproject.py -p Minerva -v ${minerva_version} --action=nguc
#
#
cd ${MYSITEROOT}/wright
python ${MINERVAPYTHON}/mkproject.py -p Weber -v ${weber_version} --action=nguc
#
#
cd ${MYSITEROOT}/wright
python ${MINERVAPYTHON}/mkproject.py -p SoVis -v ${sovis_version} --action=nguc
#
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva
python ${MINERVAPYTHON}/mkproject.py -p Mega -v ${mega_version} --action=nguc
#
#
cd ${MYSITEROOT}/minerva
python ${MINERVAPYTHON}/mkproject.py -p Vista -v ${vista_version} --action=nguc

```

A.2. Scripts usados en la configuración de las simulaciones:

A.2.1. Archivo de órdenes del generador de eventos de neutrinos GENIE

Listing A.1: genie_minerva_NuMI_LE_QEL-CC.sh

```

# Número semilla para generar los números aleatorios MC:
export GSEED=12345678
export GPRODMODE=YES
export RUN_NUMBER=0
export SUBRUN_NUMBER=0

```

```

# Indica el número de eventos a generar:
export NUMEVENTS=100

# Indica la ubicación del archivo .XML con datos de la sección eficaz precomputada:
export SPLINE_FILE=${GENIEROOT}/run/gxspl-nuclear-2.4.0-200708.xml
# Indica la ubicación del archivo ROOT que contiene la información de la geometría del detector:
export GEOMETRY_FILE=${MINERVADDDDBROOT}/DDDB/minerva-200903.root
# Histograma de energías del flujo NuMI:
export FLUX_FILE=${GENIEROOT}/run/NuMIhistos.root

outpath="./"
if [ -n "${OUTPUT_PATH:+x}" ];
then
  outpath=${OUTPUT_PATH}
fi

# Indica el nombre del detector a utilizar:
export DET_LABEL="MINERvA"
# Indica que se usará el rayo NuMI configurado a bajas energías (LE):
export FLUX_LABEL="NuMLE"
# Indica a GENIE que solo nos interesan las interacciones QEL-CC:
export MODELABEL="QEL-CC"

# Comando GENIE que ejecuta la simulación con los parametros requeridos:
# ( -p Especifica el código PDG del neutrino muonico )
${GENIEROOT}/run/runGenie -mode 3 -spline ${SPLINE_FILE} -p 14 -nevt ${NUMEVENTS} \
-geo ${GEOMETRY_FILE} -flux ${FLUX_FILE},14[hNuMi-LE-NuMu],12[hNuMi-LE-NuE] \
-outpath ${outpath} -det-label ${DET_LABEL} -flux-label ${FLUX_LABEL} -mode-label ${MODELABEL} \
-run ${RUN_NUMBER} -subrun ${SUBRUN_NUMBER} -list ${MODELABEL}

```

A.2.2. Archivo de órdenes MEGA, detector de neutrinos MINERvA

Listing A.2: Mega-Minerva-NuMI.opts

```

#include "Common.opts" // Necessary for any Mega executable

//

```

```

// Load Geometry
//-----

// Detector selection for MinervaDDDB (Xml file)
DetectorDataSvc.DetDbLocation = "$MINERVADDDDBROOT/DDDB/minerva-200903.xml";
//-----

// Applications to Run
//-----
ApplicationMgr.TopAlg += { "GaudiSequencer/Generator" };
ApplicationMgr.TopAlg += { "GaudiSequencer/Simulation" };
//-----

// Initialize the Phases: set run and first event number,
//                          hence setting random numbers to start with
//-----
Generator.Members      = { "GenInit/MegaGen" };
Simulation.Members     = { "SimInit/MegaSim" };

MegaGen.FirstEventNumber = 1;
MegaGen.RunNumber       = 1;

EventClockSvc.FakeEventTime.StartTime = 0;
EventClockSvc.FakeEventTime.TimeStep  = 25*ns;

//-----

// Simulation phase: configuration for full detector simulation,
//                          see there to with modified setup or with special
//                          simulation conditions
//-----
#include "$MEGAOPTS/Simulation.opts"

//-----

// POOL/Ntuple Output Files
//-----
ApplicationMgr.OutStream = { "MCHits" };

MCHits.ItemList = {
    "/Event/Gen/Header#1"
    ,"/Event/Gen/HepMCEvents#1"
};

```

```

MCHits.OptItemList = {    "/Event/MC/ID#1"
                        ,"/Event/MC/ID/Hits#1"
                        ,"/Event/MC/OD#1"
                        ,"/Event/MC/OD/Hits#1"
                        ,"/Event/MC/Minos/Hits#1"
};

MCHits.Output = "DATAFILE='PFN:SIM_MINERvA_0000_00000_NuMI_LE_QEL-CC_MCHits_v6r2.root'
               _TYP='POOL_ROOTTREE' _OPT='RECREATE'";

//-----
// Number of events to process
//-----

ApplicationMgr.EvtMax      = 100;

//-----
// Output level 1=VERBOSE, 2=DEBUG, 3=INFO, 4=WARNING, 5=ERROR, 6=FATAL
//-----

MessageSvc.OutputLevel     = 4;
Generator.OutputLevel      = 4;

//-----
// Choose particle source
//-----
//-- Muon Simulation
//#include "$COSMICGUNSROOT/options/MuonGun.opts"

//-- ParticleCannon
//#include "$MEGAOPTS/ParticleCannon.opts"

//-- SpillGenerator for GENIE input
#include "$MEGAOPTS/SpillGeneration.opts"

NTupleSvc.Input={"NUFILE_DATAFILE='SIM_MINERvA_0000_00000_100evts_NuMI_LE_QEL-CC_GENIE_v6r2.root'
               _TYP='ROOT' _OPT='OLD'"};

//-----

```

```
// Add here any job specific options, to over-ride previously defined options
//-----
```

A.3. Scripts usados para el análisis de los resultados

A.3.1. Calcula y gráfica en un histograma el número de trayectorias por vértice

```
void analisis_SIM_QELCC_DSTv7r7::vtx_n_tracks()
{
    if (fChain == 0) return;

    Long64_t nentries = fChain->GetEntriesFast();

    TH1F *myHisto = new TH1F("hist", "vtx_n_tracks_qelcc_dstv7r7", 20, 0, 10); // Crea histograma

    Long64_t nbytes = 0, nb = 0;
    for (Long64_t jentry=0; jentry<nentries; jentry++) { // Bucle iterativo sobre el total de eventos
        Long64_t ientry = LoadTree(jentry); // Carga los datos de un evento en particular
        if (ientry < 0) break;
        nb = fChain->GetEntry(jentry);   nbytes += nb;
        // if (Cut(ientry) < 0) continue;

        for (int i=0; i<n_vertices; i++){ // Bucle sobre el número de vértices en el evento

            myHisto->Fill(vtx_n_tracks[i]); // Llena histograma
        }
    }

    myHisto->Draw(); // Grafica histograma
    myHisto->Print("all"); // Imprime informacion del histograma
}
```

A.3.2. Programa para determinar la suma de los ángulos azimutales

```

void analisis_SIM_QELCC_DSTv7r7::sum_abs_phi()
{
if (fChain == 0) return;

Long64_t nentries = fChain->GetEntriesFast();

TH1F *myHisto = new TH1F("hist", "sum_abs_phi_qelcc_2tracks", 50, 0, 5);

Long64_t nbytes = 0, nb = 0;
for (Long64_t jentry=0; jentry<nentries; jentry++) { // Bucle sobre los eventos
Long64_t ientry = LoadTree(jentry);
if (ientry < 0) break;
nb = fChain->GetEntry(jentry);   nbytes += nb;
// if (Cut(ientry) < 0) continue;

for (int i=0; i<n_vertices; i++){ // Bucle sobre los vertices
if (vtx_n_tracks[i]==2) { // Vertices con 2 tracks
double sum_phi=0;
cout << trk_phi[vtx_tracks_idx[i][0]] << " : " << trk_phi[vtx_tracks_idx[i][1]] << endl;
cout << abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[i][0]]) << " : " << abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[i][1]])
<< endl;
// Suma de los valores absolutos de los angulos azimutales
sum_phi=abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[i][0]]) + abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[i][1]]);
cout << sum_phi << endl; // Imprime en pantalla el valor de la suma
myHisto->Fill(sum_phi); // Llena histograma
}
}
}

myHisto->Draw();
myHisto->Print("all");
}

```

A.3.3. Script para filtrar eventos reales QEL-CC

```

////////////////////////////////////
// Analisis preliminar de datos experimentales MINERvA
// Este macro ROOT selecciona posibles eventos cuasielásticos de un grupo de DSTs MINERvA
// Autor: Adolfo Chamorro
// e-mail: adolfoch@uni.pe
////////////////////////////////////
{
// se incluye libreria cmath
#include <cmath>

TChain chain("minerva");
// Lista de DSTs:
//chain.Add("SIM_minerva_00001050_0001_DST_v7r7.root");
//chain.Add("MV_00002150_0001_numip_v05_1004201612_FullChain_DST_v7r5p1.root");
chain.Add("MV_00002282_0001_numip_v05_1005311203_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0002_numip_v05_1005311247_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0003_numip_v05_1005311329_RecoData_DST_v7r7.root");
//chain.Add("MV_00002282_0004_numip_v05_1005311407_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0006_numip_v05_1005311542_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0007_numip_v05_1005311622_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0008_numip_v05_1005311657_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0009_numip_v05_1005311732_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0010_numip_v05_1005311814_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0011_numip_v05_1005311851_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0012_numip_v05_1005311926_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0013_numip_v05_1005312000_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0014_numip_v05_1005312037_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0015_numip_v05_1005312114_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0016_numip_v05_1005312151_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0017_numip_v05_1005312229_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0018_numip_v05_1005312306_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0019_numip_v05_1005312347_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0020_numip_v05_1006010025_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0021_numip_v05_1006010102_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0023_numip_v05_1006010220_RecoData_DST_v7r7.root");
chain.Add("MV_00002282_0026_numip_v05_1006010419_RecoData_DST_v7r7.root");
//chain.Add("");
// .

```

```

// .
// .

Int_t nevent = chain.GetEntries();

Int_t n_tracks;
Int_t n_vertices;
Int_t vtx_n_tracks[100];
Double_t      vtx_z[23];    //[n_vertices]
Int_t vtx_time_slice[100];
Int_t      vtx_tracks_idx[23][10];    //[n_vertices]
Double_t      trk_phi[38];    //[n_tracks]
chain->SetBranchAddress("n_tracks",&n_tracks);
chain->SetBranchAddress("n_vertices",&n_vertices);
chain.SetBranchAddress("vtx_n_tracks",vtx_n_tracks);
chain.SetBranchAddress("vtx_z",vtx_z);
chain.SetBranchAddress("vtx_time_slice",vtx_time_slice);
chain.SetBranchAddress("vtx_tracks_idx",vtx_tracks_idx);
chain.SetBranchAddress("trk_phi",trk_phi);

//Create a new file + a clone of old tree in new file
//TFile *newfile = new TFile("SIM-MisEventosQEL.root","recreate"); // Para datos simulados
TFile *newfile = new TFile("ev_QEL_filt.root","recreate"); // Para datos reales
TTree *newtree = chain->CloneTree(0);

int k=1;
for (Int_t i=0;i<nevent; i++) {
chain.GetEntry(i);
for (Int_t j=0;j<n_vertices; j++){
if (vtx_n_tracks[j]==2 && vtx_z[j]<=8590.07) { // Condicion para vertices

if ( (abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[j]][0])) + abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[j]][1])) >= 2.35) &&
(abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[j]][0])) + abs(trk_phi[vtx_tracks_idx[j]][1])) <= 3.91) )
{ // Condicion geometrica para angulos
cout<<"Entrada:_"<<k<<"_Slice:_"<<vtx_time_slice[j]<<endl;
k++;
cout << trk_phi[vtx_tracks_idx[j]][0] << "_:" << trk_phi[vtx_tracks_idx[j]][1] << endl;
newtree->Fill(); // Copia evento con posible interaccion QEL
break; // Para iteracion en j

```

```

    }
  }
}
//newtree->Print();
newtree->AutoSave();
//delete oldfile;
delete newfile;
}

```

A.3.4. Scripts para la identificación de partículas

Listing A.3: Función EventDisplay()

```

void Analisis_QEL::EventDisplay(int i)
{
  Long64_t nbytes = 0, nb = 0;
  nb = fChain->GetEntry(i-1);  nbytes += nb;

  cout << n_rawhits << endl;
  TCanvas *Panel_ED = new TCanvas("Panel_ED", "Display_del_Evento", 1);
  Panel_ED->Divide(3,1);

  TH2F *h2_X = new TH2F("h2_X", "Vista_X", 120,0,120,127,0,127);
  TH2F *h2_U = new TH2F("h2_U", "Vista_U", 120,0,120,127,0,127);
  TH2F *h2_V = new TH2F("h2_V", "Vista_V", 120,0,120,127,0,127);

  for (int j=0; j<n_rawhits; j++){
    if (hit_view[j]==1){ // Vista X
      h2_X->Fill(hit_module[j], hit_strip[j], hit_pe[j]);
      cout << hit_module[j] << " : " << hit_strip[j] << " : " << hit_pe[j] << endl;
    }
    if (hit_view[j]==2){ // Vista U
      h2_U->Fill(hit_module[j], hit_strip[j], hit_pe[j]);
      cout << hit_module[j] << " : " << hit_strip[j] << " : " << hit_pe[j] << endl;
    }
    if (hit_view[j]==3){ // Vista V
      h2_V->Fill(hit_module[j], hit_strip[j], hit_pe[j]);
    }
  }
}

```

```

cout << hit_module[j] << " : " << hit_strip[j] << " : " << hit_pe[j] << endl;
}
}
//gStyle->SetPalette(1);
//set_plot_style();
Panel_ED->cd(1);
set_root_env();
h2_X->Draw("colz");
h2_X->GetXaxis()->SetTitle("modulo");
h2_X->GetYaxis()->SetTitle("strip");
h2_X->GetZaxis()->SetTitle("PE");
add_plot_label("Vista-X", 0.40, 0.92, 0.05, 1);
Panel_ED->cd(2);
set_root_env();
h2_U->Draw("colz");
h2_U->GetXaxis()->SetTitle("modulo");
h2_U->GetYaxis()->SetTitle("strip");
h2_U->GetZaxis()->SetTitle("PE");
add_plot_label("Vista-U", 0.40, 0.92, 0.05, 1);
Panel_ED->cd(3);
set_root_env();
h2_V->Draw("colz");
h2_V->GetXaxis()->SetTitle("modulo");
h2_V->GetYaxis()->SetTitle("strip");
h2_V->GetZaxis()->SetTitle("PE");
add_plot_label("Vista-V", 0.40, 0.92, 0.05, 1);
}

```

Listing A.4: Función Gtrayect()

```

void Analisis_QEL::Gtrayect(int i)
{
Long64_t nbytes = 0, nb = 0;
nb = fChain->GetEntry(i-1);  nbytes += nb;

cout << "Numero_de_vertices_en_este_ev_gate:" << n_vertices << endl;

for (int j=0; j<n_vertices; j++){
cout << " vertice " << j+1 << " tiene " << vtx_n_tracks[j] << " track asociado(s)" << endl;
}
}

```

```

cin.get();

if (vtx_n_tracks[j]==2){ // Vertice con 2 trayectorias
cout << "VERTICE_" << j << "_(" << con_2_trayectorias << ")" << endl;
TCanvas *Panel_Trayect = new TCanvas("Panel_Trayect", "Display_de_Trayectorias", 1);
Panel_Trayect->Divide(3,1);
set_root_env();
cout << "Nodos_trayectoria_1:" << endl;
double X1[300], Y1[300], Z1[300];
for (int k=0; k<trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][0] ]; k++){
X1[k]=trk_node_X[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k];
Y1[k]=trk_node_Y[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k];
Z1[k]=trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k];
cout << trk_node_X[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k] << " : " <<
trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k] << endl;
}
int n_nodos1=0;
n_nodos1=trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][0] ];
TGraph *gr1_ZX = new TGraph (n_nodos1, Z1, X1);
TGraph *gr1_ZY = new TGraph (n_nodos1, Z1, Y1);
TGraph *gr1_XY = new TGraph (n_nodos1, X1, Y1);
//gr1->Draw("AC*");

cout << "Nodos_trayectoria_2:" << endl;
double X2[200], Y2[200], Z2[200];
for (int k=0; k<trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][1] ]; k++){
X2[k]=trk_node_X[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k];
Y2[k]=trk_node_Y[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k];
Z2[k]=trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k];
cout << trk_node_X[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k] << " : " <<
trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k] << endl;
}
int n_nodos2=0;
n_nodos2=trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][1] ];
TGraph *gr2_ZX = new TGraph (n_nodos2, Z2, X2);
TGraph *gr2_ZY = new TGraph (n_nodos2, Z2, Y2);
TGraph *gr2_XY = new TGraph (n_nodos2, X2, Y2);
//gr2->Draw("C*");

```

```

Panel_Trayect ->cd (1);
gr1_ZX->SetLineColor (4);
gr2_ZX->SetMarkerStyle (21);
gr2_ZX->SetLineColor (2);
gr1_ZX->Draw ("AC*");
gr2_ZX->Draw ("CP");
gr1_ZX->GetXaxis()->SetTitle ("Z_(mm)");
gr1_ZX->GetYaxis()->SetTitle ("X_(mm)");
add_plot_label ( "Proyeccion_ZX" , 0.35, 0.92, 0.05, 1 );

Panel_Trayect ->cd (2);
gr1_ZY->SetLineColor (4);
gr2_ZY->SetMarkerStyle (21);
gr2_ZY->SetLineColor (2);
gr1_ZY->Draw ("AC*");
gr2_ZY->Draw ("CP");
gr1_ZY->GetXaxis()->SetTitle ("Z_(mm)");
gr1_ZY->GetYaxis()->SetTitle ("Y_(mm)");
add_plot_label ( "Proyeccion_ZY" , 0.35, 0.92, 0.05, 1 );

Panel_Trayect ->cd (3);
gr1_XY->SetLineColor (4);
gr2_XY->SetMarkerStyle (21);
gr2_XY->SetLineColor (2);
gr1_XY->Draw ("AC*");
gr2_XY->Draw ("CP");
gr1_XY->GetXaxis()->SetTitle ("X_(mm)");
gr1_XY->GetYaxis()->SetTitle ("Y_(mm)");
add_plot_label ( "Proyeccion_XY" , 0.35, 0.92, 0.05, 1 );

Panel_Trayect ->Update ();
}
}
}

```

Listing A.5: Función PEsNodo()

```

void Analisis_QEL::PEsNodo(int i)
{

```

```

Long64_t nbytes = 0, nb = 0;
nb = fChain->GetEntry(i-1);    nbytes += nb;
cout << "Numero_de_vertices_en_este_ev_gate:_" << n_vertices << endl;
for (int j=0; j<n_vertices; j++){
cout<< " vertice_"<<j+1<< "_tiene_"<< vtx_n_tracks[j] << "_track_asociado(s)" << endl;
cin.get();

if (vtx_n_tracks[j]==2){
cout << vtx_tracks_idx[j][0] << ":_:" << vtx_tracks_idx[j][1] << endl;

//MiC_dEgraf->Divide(2,1);

cout << "Trayectoria_#1:_" << endl;
Double_t Z1[297], PE1[297];
for (int k=0; k<trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][0] ]; k++){
Z1[k]=trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k];
PE1[k]=clus_pe[ trk_node_cluster_idx[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k] ];
cout << trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k] << ":_:" <<
clus_pe[ trk_node_cluster_idx[ vtx_tracks_idx[j][0] ][k] ] << endl;
}
//MiC_dEgraf->cd(1);
int n_nodos1=0;
n_nodos1=trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][0] ];
TGraph *gr1 = new TGraph (n_nodos1, Z1, PE1);

cout << "Trayectoria_#2:_" << endl;
Double_t Z2[297], PE2[297];
for (int k=0; k<trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][1] ]; k++){
Z2[k]=trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k];
PE2[k]=clus_pe[ trk_node_cluster_idx[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k] ];
cout << trk_node_Z[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k] << ":_:" <<
clus_pe[ trk_node_cluster_idx[ vtx_tracks_idx[j][1] ][k] ] << endl;
}
//MiC_dEgraf->cd(2);
int n_nodos2=0;
n_nodos2=trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][1] ];
TGraph *gr2 = new TGraph (n_nodos2, Z2, PE2);

TCanvas *Panel_PEsNodo = new TCanvas("Panel_PEsNodo", "PEs_recolectados_vs_nodo", 1);

```

```

set_root_env ();

gr1->SetTitle("PEs_recolectados_vs_nodo");
gr1->SetLineColor(4);
gr1->Draw("AC*");
gr1->GetXaxis()->SetTitle("Z-Nodo_(mm)");
gr1->GetYaxis()->SetTitle("PEs_recolectados");
gr1->GetXaxis()->CenterTitle();
gr1->GetYaxis()->CenterTitle();
//gr2->SetTitle("Track 2");
gr2->SetMarkerStyle(21);
gr2->SetLineColor(2);
gr2->Draw("CP");
Panel_PEsNodo->Update();
}
}
}

```

Listing A.6: Función PEsMod()

```

void Analisis_QEL::PEsMod(int i)
{
Long64_t nbytes = 0, nb = 0;
nb = fChain->GetEntry(i-1);  nbytes += nb;
cout << "Numero_de_vertices_en_este_ev_gate:_" << n_vertices << endl;
for (int j=0; j<n_vertices; j++){

cout<< " vertice_"<<j+1<< " _tiene_"<< vtx_n_tracks[j] << " _track_asociado(s)" << endl;
cin.get();

if (vtx_n_tracks[j]==2){
cout << vtx_tracks_idx[j][0] << " _:" << vtx_tracks_idx[j][1] << endl;
cout << " Trayectoria_#1:" << endl;
TH1F *h1 = new TH1F("h1", "Track_1", 120, 1, 121);
for (int k=0; k<trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][0] ]; k++){
for (int l=0; l<clus_size[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][0]][k]][1]){
cout << hit_module[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][0]][k]][1]]
<< " _:" << hit_pe[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][0]][k]][1]]
<< endl;
}
}
}
}
}

```

```

h1->Fill(hit_module[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][0]][k]][1]],
hit_pe[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][0]][k]][1]]);
}
}

cout << "Trayectoria_#2:" << endl;
TH1F *h2 = new TH1F("h2", "Track_2", 120, 1, 121);
for (int k=0; k<trk_nodes[ vtx_tracks_idx[j][1] ]; k++){
for (int l=0; l<clus_size[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][1]][k]]; l++){
cout << hit_module[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][1]][k]][1]]
<< ":" << hit_pe[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][1]][k]][1]]
<< endl;
h2->Fill(hit_module[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][1]][k]][1]],
hit_pe[clus_hits_idx[trk_node_cluster_idx[vtx_tracks_idx[j][1]][k]][1]]);
}
}
TCanvas *Panel_PEsMod = new TCanvas("Panel_PEsMod", "PEs_recolectados_vs_modulo", 1);
set_root_env();
h1->SetLineColor(4);
h1->SetLineWidth(2);
h1->Draw();
h1->GetXaxis()->SetTitle("modulo");
h1->GetYaxis()->SetTitle("PEs_recolectados");
h1->GetXaxis()->CenterTitle();
h1->GetYaxis()->CenterTitle();
h2->SetLineColor(2);
h2->SetLineWidth(2);
h2->Draw("same");
Panel_PEsMod->Update();
}
}
}

```

Bibliografía

- [1] The MINERvA collaboration: C. J. Solano Salinas *et al.* *Measurement of Muon Neutrino Quasi-Elastic Scattering on a Hydrocarbon Target at $E_\nu \sim 3,5\text{GeV}$.* **Phys. Rev. Lett.** **111**, 022502 (2013).
- [2] The MINERvA collaboration: C. J. Solano Salinas *et al.* *Measurement of Muon Antineutrino Quasi-Elastic Scattering on a Hydrocarbon Target at $E_\nu \sim 3,5\text{GeV}$.* **Phys. Rev. Lett.** **111**, 022501 (2013).
- [3] The MINERvA collaboration: C. J. Solano Salinas, **A. Chamorro** (UNI, Lima), *et al.*. Mar 2012. 10 pp. *Demonstration of Communication using Neutrinos.* **Mod.Phys.Lett.** **A27** (2012) 1250077.
- [4] The MINERvA collaboration: C. J. Solano Salinas *et al.* *The MINERvA data acquisition system and infrastructure,* **Nucl.Instrum.Meth.** **A694** (2012) 179-192.
- [5] The MINERvA collaboration: C. J. Solano Salinas *et al.* *Arachne A web-based event viewer for MINERvA.* **Nucl.Instrum.Meth.** **A676** (2012) 44-49.
- [6] Kevin S. McFarland, for the MINERvA Collaboration. *Quasi-Elastic Scattering in MINERvA.* **Fermilab CONF-11-369-E.**

- [7] Marco Alania (Lima, Natl. Eng. U.), Ignacio J. Araya (Chile U., Catolica), **Adolfo V. Chamorro Gomez** (Lima, Natl. Eng. U.), Humberto Martinez Huerta, Alejandra Parra Flores (Puebla U., Inst. Fis.), Johannes Knapp (Leeds U.). 2009. 16 pp. *Air shower simulations*. **AIP Conf.Proc. 1123 (2009) 150-165.**
- [8] O. Castillo, **A. Chamorro**, J.F. Grosse-Oetringhaus, B. Lenzi, B. Panes, M. Tibbetts, C. Valenzuela, S. Yacoob, A.G. Yagues, C. Zanetti. 2008. 6 pp. CERN-2008-004. *Theoretical and experimental considerations for neutrinoless double beta decay*. **Proceedings of 4th CERN-CLAF School of Conference: C07-02-18, p.307-312.**
- [9] MINER ν A Collaboration (C.J. Solano Salinas, **A. Chamorro**, *et al.*). 2007. *MINER ν A a neutrino nucleus interaction experiment*. **AIP Conf.Proc. 947 (2007) 239-244.**
- [10] C.J. Solano Salinas, **A. Chamorro**, *et al.* 2007. *A Student Project to use Geant4 Simulations for a TMS-PET combination*. **AIP Conf.Proc. 947 (2007) 499-500.**
- [11] Karagiorgi, G.A. Aguilar-Arevalo, J.M. Conrad, and M.H. Shaevitz. Leptonic CP violation studies at MiniBooNE in the (3+2) sterile neutrino oscillation hypothesis, **Phys Rev D 75 (2007)1.**
- [12] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, Prog. Theor. Phys. 28, 870 (1962).
- [13] S. L. Glashow, **Nucl. Phys., 22, 579-588, 1961.**
- [14] S. Weinberg, **Phys. Rev. Lett., 19, 1264-1266, 1967.**

- [15] A. Salam, 1969, *Proc. of the 8th Nobel Symposium on Elementary Particle Theory, Relativistic Groups and Analyticity, Stockholm, Sweden, 1968*, edited by N. Svartholm, p. **367-377**.
- [16] S. M. Bilenky, *Introduction to Feynman diagrams and electroweak interactions physics*, **Editions Frontieres, 1994**.
- [17] Carlo Giunti, Chung W. Kim, *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*, **Oxford University Press, 2007**.
- [18] C. H. Llewellyn Smith, **Phys. Rep.**, **3**, **261**, **1972**.
- [19] E. Leader and E. Predazzi, *Camb. Monogr. Part. Phys. Nucl. Phys. Cosmol.*, **3**, **1**, **1996**.
- [20] von Bayer, O. Hahn, L. Meitner, **Phys. Zeitschrift**, **12**, **January, 1911**, p. **378**
- [21] P. Renton, *Electroweak Interactions: an Introduction to the Physics of Quarks and Leptons*, **Cambridge University Press, 1990**
- [22] C.D. Ellis, B.A. Wooster, The average energy of desintegration of Radium E, **Proc. Roy. Soc. A117(1927) 109-123**
- [23] W. Pauli, carta enviada á Conferéncia de Tubingen, Dec. 1930.
- [24] J. Chadwick, Possible existence of a neutron, **Nature 129 (1932)12**.
- [25] E. Fermi, **Ricerca Scient.** **2** **12(1933)**.
- [26] F.Perrin, **Comptes rendues 197, 1624(1933)**.
- [27] E. Fermi, **Z. Physik**, **88 161(1934)**.
- [28] F. Reines and C.L. Cowan, The neutrino, **Nature 178 (1956)446**.

- [29] M. Goldhaber, L. Grodzins, and A.W. Sunyar, Helicity of neutrinos, **Phys. Rev.** **109 (1958)1015**.
- [30] R. Davis and D.S. Harmer, Attempt to Observe the $\text{Cl}^{37}(\bar{\nu}, e^-)\text{Ar}^{37}$ Reaction Induced by Reactor Antineutrinos, **Bull. Am. Phys. Soc.** **4, (1959)217**.
- [31] G. Danby *et al.*, Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos, **Phys. Rev. Lett.** **9 (1962)36**.
- [32] 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**.
- [33] R. Davis, D.S. Harner, and K.C. Hoffman, Search for neutrinos from the sun, **Phys. Rev. Lett.** **20 (1968)1205**.
- [34] R.N. Mohapatra e P.B. Pal, Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics, **World Scientific (1998)**
- [35] V.N. Gribov and B. Pontecorvo, **Phys. Lett B** **28(1969)493**.
- [36] ALEPH Collaboration: D. Decamp *et al.*, Determination of the Number of Light Neutrino Species, **Phys. Lett. B** **231(1989)519**.
- [37] Delphi Collaboration: P.A. Aarnio *et al.*, Measurement of the Mass and Width of the Z^0 Particle from Multi-Hadronic Final States Produced in the $e^+ e^-$ Annihilation, **Phys. Lett. B** **231 (1989)539**.
- [38] L3 Collaboration: B. Adeva *et al.*, A Determination of the Properties of the Neutral Intermediate Vector Boson Z^0 , **Phys. Lett. B** **231 (1989)509**.

- [39] OPAL Collaboration: M.Z. Akrawy *et al.*, Measurement of the Z0 Mass and Width with the OPAL Detector at LEP, **Phys. Lett. B** **231** (1989)530.
- [40] DONUT Collaboration: T. Patzak, First direct observation of the tau neutrino, **Europhys. News** **32**, 56 (2001).
- [41] C.S. Wu *et al.*, **Phys. Rev.** **105** (1957)1413.
- [42] Super-Kamiokande Collaboration: Y. Fukuda *et al.*, Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, **Phys. Rev. Lett.** **81**, (1998)1562.
- [43] Soudan 2 Collaboration: M.C. Sanchez *et al.*, Observation of atmospheric neutrino oscillations in Soudan 2, **Phys. Rev. D** **68** (2003)113004.
- [44] 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.
- [45] KamLAND Collaboration: K. Eguchi *et al.*, First results from KamLAND: Evidence for reactor anti-neutrino disappearance, **Phys. Rev. Lett.** **90**, (2003)021802.
- [46] K2K Collaboration: M.H. Ahn *et al.*, Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment, **Phys. Rev. D** **74** (2006)072003.
- [47] 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.
- [48] M. Apollonio *et al.*, Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station, **Eur. Phys. J. C** **27**, 331-374 (2003).
- [49] F. Boehm *et al.*, **Phys. Rev.**, **D64**, 112001, 2001, hep-ex/0107009.

- [50] T. Araki *et al.*, **Phys. Rev. Lett.**, **94**, 081801, 2005, hep-ex/0406035.
- [51] Particle Data Group, **J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.** **33** (2006).
- [52] C. Andreopoulos *et al.*, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment** **614**, 87 (2010)
- [53] Knoll, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. **John Wiley & Sons, Ltd.** (2000).
- [54] J. Hylen *et al.*, NuMI Technical Design Handbook, **Internal NuMI report** (2003).
- [55] R. M. Zwaska, Accelerator Systems and Instrumentation for the NuMI Neutrino Beam, **PhD thesis University of Texas at Austin, 2005.**
- [56] Proposal to Perform a High-Statistics Neutrino Scattering Experiment Using a Fine-grained Detector in the NuMI Beam, <http://minerva.fnal.gov/proposal.pdf>
- [57] H. Kluttig, J.G. Morfin e W.Van Doninck, **Phys.Lett.** **B71** (1977),446.
- [58] O. Erriquez *et al.*, **Phys. Lett. B** **73** (1978)350.
- [59] W. Krenz *et al.*, **Nucl. Phys.** **B135** (1978)45.
- [60] M. Pohl *et al.*, **Phys. Lett.** **B82** (1979)461.
- [61] W.-Y. Lee *et al.*, **Phys. Rev. Lett.** **38** (1977)202.
- [62] S.J. Barrish *et al.*, **Phys. Rev. Lett** **33** (1974)448.
- [63] M. Derrick *et al.*, **Phys. Lett B** **92** (1980)363.

- [64] M. Derrick *et al.*, **Phys. Lett B** **23** (1981)569.
- [65] N.J. Baker *et al.*, **Phys. Rev. D** **23** (1981)2495.
- [66] <http://proj-gaudi.web.cern.ch/proj-gaudi/>
- [67] <http://lcg.web.cern.ch/LCG/>
- [68] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>
- [69] <http://atlas.ch/>
- [70] <http://www-glast.stanford.edu/>
- [71] <http://harp.web.cern.ch/harp/>
- [72] <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/ShowDocument?docid=4222>
- [73] <http://root.cern.ch/>
- [74] <http://proj-clhep.web.cern.ch/proj-clhep/>.
- [75] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [76] <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/ShowDocument?docid=1741&version=2>
- [77] <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/ShowDocument?docid=1974>
- [78] K. Zuber, "Neutrino Physics", Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, Oxford, 22,32,57(2004).
- [79] W.N. Cottingham and D.A Greenwood, "An Introduction to the Standard Model of Particle Physics", Second Editions, Cambridge University, xv,42 (2001).
- [80] D. Griffiths, "Introduction to Elementary Particles", John Wiley and Sons, Inc, (1987).

- [81] D. Perkins, "Introduction to High Energy Physics", 4th edition, Cambridge University Press, 246 (2000).
- [82] A. Thomas and W. Weise, "The structure of the nucleon", Wiley-VCH, 8 (2001)
- [83] C. Giunti and C. Kim, "Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics", 193 (2007)
- [84] <http://minerva.fnal.gov/news/mri.html>
- [85] <http://openscientist.lal.in2p3.fr/>
- [86] An integration to do scientific visualization and data analysis, G. Barrand, permanent debugger of CERN software at LAL, http://openscientist.lal.in2p3.fr/download/presentations/CHEP04_OpenScientist.ppt
- [87] http://ppewww.physics.gla.ac.uk/pickford/pacman3/LHCb/dev-source/openscientist-v14r0/OpenScientist/v14r0/OnX/v16r0/doc/h/onx_introduction.h
- [88] GUI User's Manual (Windows DAQ)" (DocDB-MINERvA Document 3027-v3 <http://minerva-docdb.fnal.gov:8080/cgi-bin/ShowDocument?docid=3027>
- [89] NuMI Technical Design Handbook, retrieved 5 October 2007
- [90] Sacha E. Kopp, "The NuMI Neutrino Beam at Fermilab, Department of Physics", Austin, TX, 2004
- [91] <http://www-numi.fnal.gov/Minos/>
- [92] <http://www.kuraray.co.jp/en/>
- [93] The MINERvA Technical Design Report, Colaboración MINERvA, FERMILAB-DESIGN-2006-01, MINERVA-DOCUMENT-700, 2006. 252pp.

- [94] J. Estrada, C. Garcia, B. Hoeneisen and P. Rubinov, "MCM II and the Trip Chip", August 2002, FERMILAB-TM-2226.
- [95] Brookhaven's Alternating Gradient Synchrotron,
<http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/AGS.asp>
- [96] Neutral currents are revealed, <http://public.web.cern.ch/public/en/About/History73-en.html>
- [97] Tau lepton Discovery, Perl, Martin L, U.S.A, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, C,
<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/nobel/1995nobel.html>