



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO PARA
EL DETECTOR ALICE V0-PLUS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A :

NORMA ARACELI NAVA MORENO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. VARLEN GRABSKI**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno.

Nava

Moreno

Norma Araceli

55 17 11 40 06

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

304308149

2. Datos del tutor

Dr

Varlen

Grabski

3. Datos del sinodal 1

Dr

Arturo Alejandro

Menchaca

Rocha

4. Datos del sinodal 2

Dr

Eleazar

Cuautle

Flores

5. Datos del sinodal 3

Dr

Roelof

Bijker

6. Datos del sinodal 4

Dr

Víctor Manuel

Velázquez

Aguilar

7. Datos del trabajo escrito

Construcción Del Primer Prototipo Para El Detector ALICE V0-Plus

56 p.

2016

Agradecimientos

Doy gracias a mis padres Jorge Nava y Rocío Moreno porque me apoyaron en todo momento y me enseñaron a nunca rendirme guiándome en esta carrera. A mis hermanitos, Raquel, que es un ejemplo a seguir por su fortaleza, Jorge una mente brillante que todo lo cuestiona, Oscar porque eres un soñador y sé que algún día cumplirás tus sueños. Los amo por sobre todas las cosas. Agradezco a Alberto que fue quien me impulso por este camino y fue mi sostén en todo momento. Para mi cuñada Marlene y mi cuñado Fabián, que esta meta los alenté para continuar con sus anhelos. Dedico este trabajo a mi sobrina Zyanya, espero que esto te sirva como ejemplo para que algún día te realices profesionalmente. Amigos y compañeros de la carrera, Erika, Josué, Octavio, Benito con su amistad todo fue más ameno.

Por supuesto agradezco a mi asesor Varlen Grabski que me apoyo en este trabajo y de quien aprendí muchas cosas. Gracias a todos los del grupo de trabajo, Dr. Arturo Menchaca, Roberto, Vladimir, Saúl, Diego Gómez, Diego Estrada, Vianey, Charly, Fernanda, Marco, Oscar, porque todos pusieron su granito de arena en esta tesis.

A ésta Máxima Casa de Estudios que me albergó durante todo este tiempo.

Por ustedes y para ustedes.

Contenido

CAPÍTULO 1. EL ACELERADOR MÁS GRANDE DEL MUNDO	6
1.1 ALICE	9
CAPÍTULO 2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO V0+	12
2.1. V0 (Vertex Zero).....	12
2.2 Construcción de V0-plus.....	15
2.2.1. Actualización.....	15
2.2.3. Diseño	15
2.2.4. Prototipo.....	16
2.2.4.1. Detector de centelleo.....	17
2.2.4.2. Centellador	17
2.2.4.3 Poder de frenado.....	22
2.2.4.4. Guías de luz.....	24
2.2.4.5. Fotomultiplicador	26
2.3. Construcción.	28
2.4. Toma de datos	33
2.4.1. Pulsos	34
2.4.2. Señales lineales y lógicas.....	35
2.4.3. Señales lentas y rápidas.....	35
2.4.4. Electrónica NIM.....	35
2.4.5. Módulos electrónicos para el procesamiento de señales.....	36
2.4.5.1. Fan in/out.....	36

2.4.5.2. Discriminador	36
2.4.5.3. Unidad de coincidencias.....	37
2.4.5.4. Flash ADC	37
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....	38
3.1. Pruebas.....	38
3.1.1. Comparación entre fotomultiplicadores.....	39
3.1.2. Reflectores.....	41
3.1.3. Resolución temporal.....	47
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	49
Referencias	54

CAPÍTULO 1. EL ACELERADOR MÁS GRANDE DEL MUNDO

El Gran Colisionador de Hadrones o LHC por sus siglas en inglés (Large Hadron Collider, Fig.1.1) es el acelerador de partículas más grande del mundo ubicado en la Organización Europea para la Investigación Nuclear, CERN por sus siglas en francés. Éste se encuentra en las cercanías de Ginebra en la frontera franco-suiza. El LHC consiste en un anillo de imanes de 27 kilómetros de circunferencia, ubicado a una profundidad de entre 45 y 170 metros con una pendiente horizontal del 1.4%. Dentro del acelerador, hay dos haces de partículas a altas energías que viajan a velocidades cercanas a la de la luz que se hacen colisionar. Éstos viajan en direcciones opuestas en tubos separados. Los dos tubos mantienen un alto vacío (10^{-11} Torr) pero este vacío no es absoluto, así que las partículas pueden colisionar con gas residual que se encuentra dentro de los tubos. Los haces son guiados alrededor del anillo del acelerador por un campo magnético fuerte mantenido por electroimanes superconductores. El LHC acelera protones a una energía máxima de 7 TeV, obteniendo 14 TeV en la colisión, y núcleos de Pb a 5.5 TeV [1].

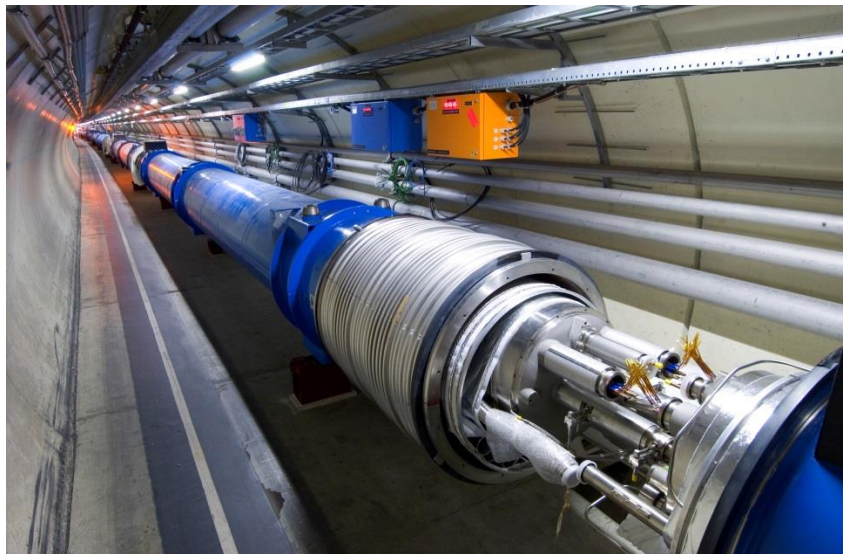


Figura 1.1. Parte del acelerador LHC y su interior. Copyright CERN.

Antes de que las partículas sean aceleradas por el LHC, viajan a través de una cadena de aceleradores que poco a poco los impulsan. Primero están dos aceleradores lineales LINAC, uno como inyector de protones y otro para el haz de plomo. El primero lanza a los

protones con una energía de 50 MeV hacia el PSB (Proton Synchrotron Booster). Aquí las partículas alcanzan una energía de 1.4 GeV. Posteriormente pasan al PS (Proton Synchrotron) donde consiguen 25 GeV. Después se envían al SPS (Super Proton Synchrotron) adquiriendo 450 GeV, energía con la que son inyectados en el LHC, y donde son acelerados durante 20 minutos hasta llegar a los 7 TeV (Figura 1.2) [2].

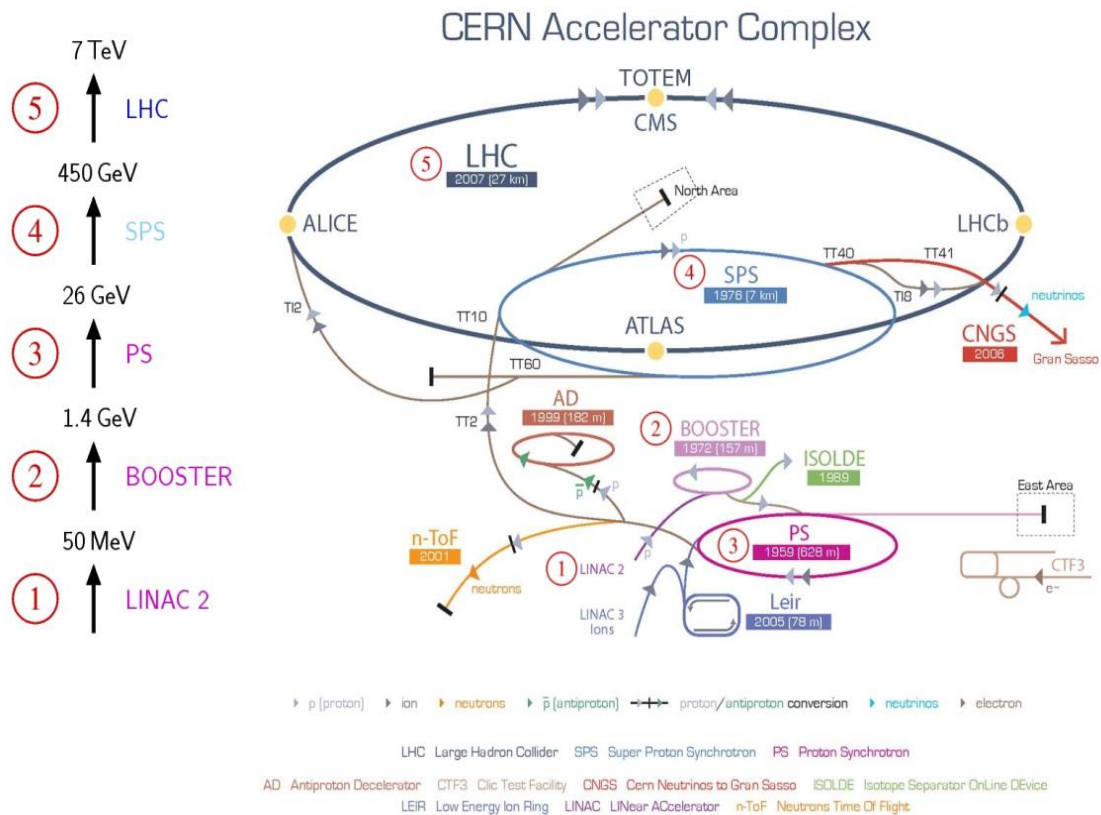


Figura 1.2. Complejo de aceleradores que permiten llegar a los 7 TeV.

Todos los controles del acelerador, sus servicios y la infraestructura técnica se encuentran bajo un mismo espacio en el Centro de Control del CERN. Desde aquí, se guían los haces en el interior del LHC para colisionar en cuatro lugares alrededor del anillo acelerador, lo que corresponde a las posiciones de los cuatro detectores más importantes de partículas: ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid) y LHCb (The Large Hadron Collider beauty experiment), Figura

1.3.

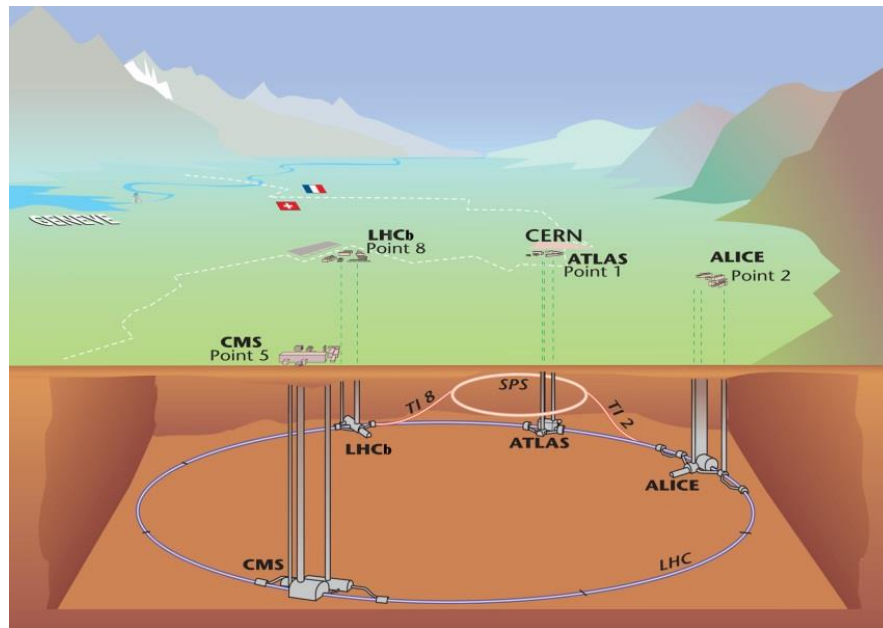


Figura 1.3. Distribución de los cuatro detectores más importantes. Copyright CERN.

El programa experimental en el LHC aborda el estudio del mecanismo de ruptura de simetría a través de enfoques experimentales complementarios. Los dos experimentos mayores ATLAS y CMS buscan a la partícula de Higgs, la cual genera la masa de los bosones de norma electrodébiles y la masa desnuda de los fermiones elementales a través del rompimiento espontáneo de la simetría de norma electrodébil. Además, en estos experimentos se buscan partículas supersimétricas que son manifestaciones de la ruptura intrínseca entre fermiones y bosones en extensiones del modelo estándar.

Dos experimentos de dimensión mediana, ALICE y LHCb, van equipados con detectores especializados y analizan fenómenos específicos durante las colisiones en el LHC.

LHCb se enfoca en realizar mediciones precisas con quarks b y estudia procesos que violan la simetría CP.

ALICE está diseñado para estudiar la física de las interacciones fuertes de la materia a densidades de energía extrema, donde se forma una fase de la materia, es llamada plasma de quarks y gluones. Esto con la finalidad de recrear condiciones similares a las que existieron justo después del big bang.

1.1 ALICE

ALICE es un detector que estudia colisiones de iones pesados (Pb-Pb) a 5.5 TeV en el LHC. Los datos obtenidos permiten estudiar la evolución de la materia desde el nacimiento del Universo hasta nuestros días. También estudia colisiones de núcleos pesados con cualquier número másico A , ya sea con protones (p-A) o entre sí (A-A), incluso interacciones protón-protón (p-p). ALICE pesa 10,000 toneladas con 26 m de largo, 16 m de altura y 16 m de ancho. El detector se encuentra en una enorme bodega 56 m bajo tierra cerca de la aldea de StGenis-Pouilly, Francia, donde pasan los haces del LHC [3].

ALICE contiene un sistema de 18 subdetectores que ayudan a reconstruir y estudiar las colisiones de los núcleos mediante los restos recolectados que a su vez interactúan con cada subdetector, ya que éstos últimos están contruidos con materiales de alta densidad situados a unos 110 metros antes y después de ALICE. Las mediciones se realizan con FMD (The Forward Multiplicity Detector), V0 y T0 del número de partículas producidas en la colisión y su distribución espacial [4]. A continuación se muestra la estructura del detector ALICE, Figura 1.4.

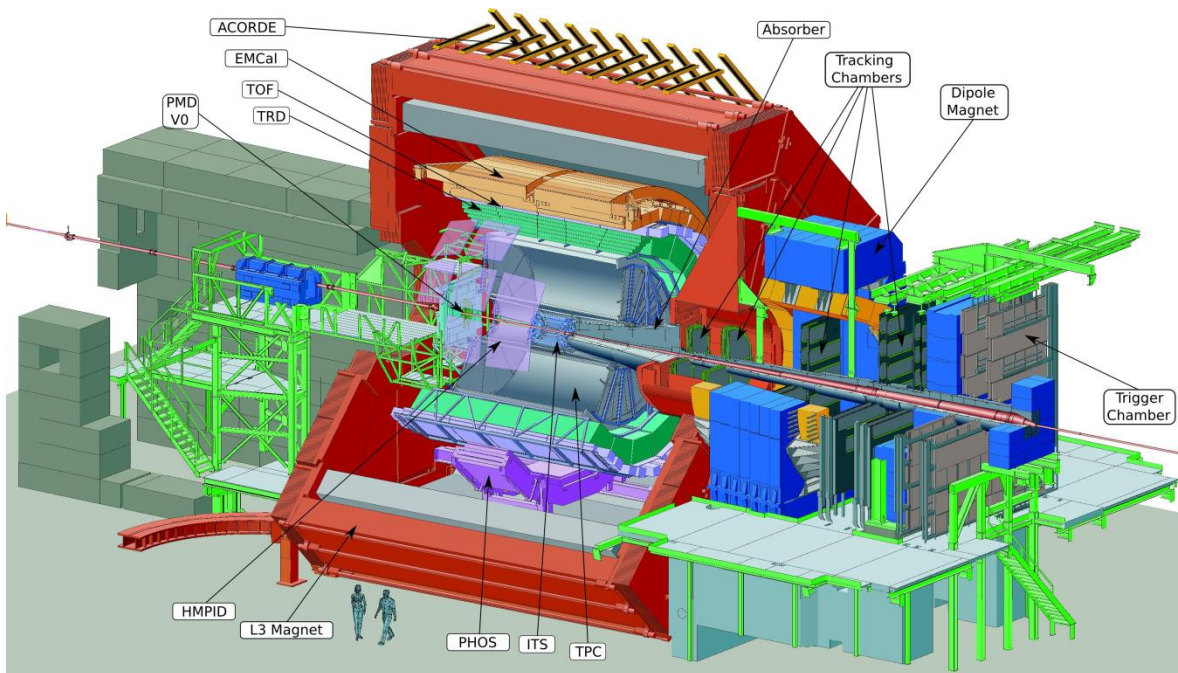


Figura 1.4. Estructura de ALICE y sus detectores. Copyright CERN.

ALICE consta de un imán que cubre parcial o totalmente la mayoría de los detectores. Con su campo magnético desvía la trayectoria de las partículas cargadas. Cuenta con cámaras de disparo que seleccionan los eventos que contienen pares de muones. El dipolo magnético induce una curvatura a la trayectoria de los muones para medir su carga y su impulso.

En la región central se encuentran los siguientes detectores:

- ITS (Inner Tracking System) permite la reconstrucción del vértice principal de la colisión, y de la reconstrucción de vértices secundarios para el charm (mesones B y D) y para las desintegraciones de hiperones.
- La cámara de proyección temporal, TPC (Time Projection Chamber), es el principal detector de trazas de ALICE en la zona de rapidez media. Junto con los otros detectores centrales proporciona el momento y la identificación de partículas cargadas a través de la pérdida de energía por ionización.
- El detector de tiempo de vuelo, TOF (Time Of Flight), proporciona la medida del tiempo entre el instante de la colisión y el instante en el que las partículas producidas en las colisiones llegan al mismo. El tiempo cero, se determina principalmente con el detector T0.
- El detector de radiación de transición TRD (Transition Radiation Detector) sirve para separar electrones de piones mediante la radiación de transición, especialmente por encima de 1 GeV/c. Además, contribuye a mejorar la reconstrucción del momento y actúa como un trigger para electrones de alto momento.
- El calorímetro electromagnético PHOS (PHOton Spectrometer), permite la identificación de partículas neutras.
- El calorímetro electromagnético EMCAL (Electro Magnetic CALorimeter), sirve para fotones de alta energía, hadrones neutros y electrones.
- El identificador de partículas de alto momento HMPID (High-Momentum Particle Identification Detector). Es un arreglo de anillos de imagen de detectores Cherenkov.

- El detector de rayos cósmicos ACORDE (ALICE COSmic Ray Detector), se encuentra sobre uno de los imanes para actuar como trigger en la calibración de ALICE, y el estudio de rayos cósmicos de alta energía.
- El calorímetro de cero grados ZDC (Zero Degree Calorimeter), consiste de dos calorímetros hadrónicos y de neutrones ubicados a 0° y a 115 m del vértice de interacción para medir el parámetro de impacto, y el número de participantes, mediante la medida de la energía que llevan los nucleones espectadores.
- Los calorímetros electromagnéticos ZEM (Zero degree Electromagnetic Calorimeter) sirven para eliminar la ambigüedad debido a la fragmentación de los proyectiles residuales.
- El conjunto de detectores de multiplicidad FMD (Forward Multiplicity Detector) cubren la región de alta rapidez.
- El sistema de centelleadores V0, son dos detectores que están ubicados a 3.3 m y -0.9 m del punto de interacción. Éstos proporciona el trigger de sesgo mínimo junto con el SPD, dos triggers de centralidad para las colisiones Pb - Pb, control de la luminosidad, validación de la señal para el trigger de muones, y eliminación del ruido en las colisiones p-p.
- El sistema de contadores de cuarzo T0, sirve para medir el tiempo cero.
- El detector de multiplicidad de fotonesPMD Photon Multiplicity Detector.
- El espectrómetro de muones MUON, se utiliza para medir las resonancias de quarks.

CAPÍTULO 2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO V0+

2.1. V0 (Vertex Zero)

V0 es un detector de trigger a nivel cero diseñado para ALICE. Consta de dos arreglos de centelladores, V0A y V0C, el primero a cargo del Instituto de Física y del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México, además del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional; mientras que el segundo fue realizado en la Universidad de Lyon, Francia. El detector V0A está situado a 327.5 cm del punto de colisión sobre el eje del haz (eje z), de lado opuesto al espectrómetro de muones y el V0C a 87.1 cm del punto de colisión sobre el eje del haz, frente al amortiguador hadrónico [5] (Fig 2.1).

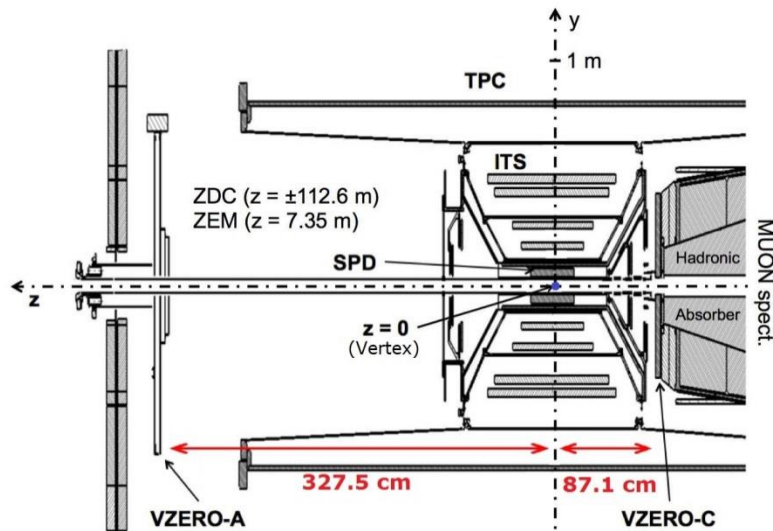


Figura 2.1. Posición de los detectores V0A y V0C dentro del experimento ALICE.

El V0A genera el disparo para los detectores centrales en colisiones p-p y A-A. Por su resolución temporal, hace una distinción entre colisiones de haz-haz y colisiones haz - gas

residual. Éste también mide la multiplicidad¹ del evento para conocer el parámetro de impacto de la colisión. También mide la luminosidad del evento a partir del número de interacciones por segundo. Proporciona una señal de disparo con multiplicidad mínima (Minimum Bias²) para los detectores de la región central [6].

El diseño de V0A está restringido debido a los volúmenes de los detectores del sistema central, el TPC y el ITS, y por la parte superior por el espectrómetro de muones. Estas limitaciones llevaron a realizar un diseño en forma de disco de 100 cm de diámetro y 60 mm de grosor, con un agujero central de 80mm de diámetro [7]. El disco está dividido en ocho sectores de 45° que a su vez se dividen por cuatro anillos formando 32 celdas. Cada sector está unido a otro por medio de pegamento óptico mezclado con dióxido de titanio. Obteniendo así 32 detectores independientes (Fig. 2.2).

En cada celda están incrustadas fibras corredoras de frecuencia. Cada fibra esta aluminizada en una de sus caras, mientras que en la otra cara esta introducida en un adaptador de lucita que es acoplado al tubo fotomultiplicador, ver Figura 2.2.

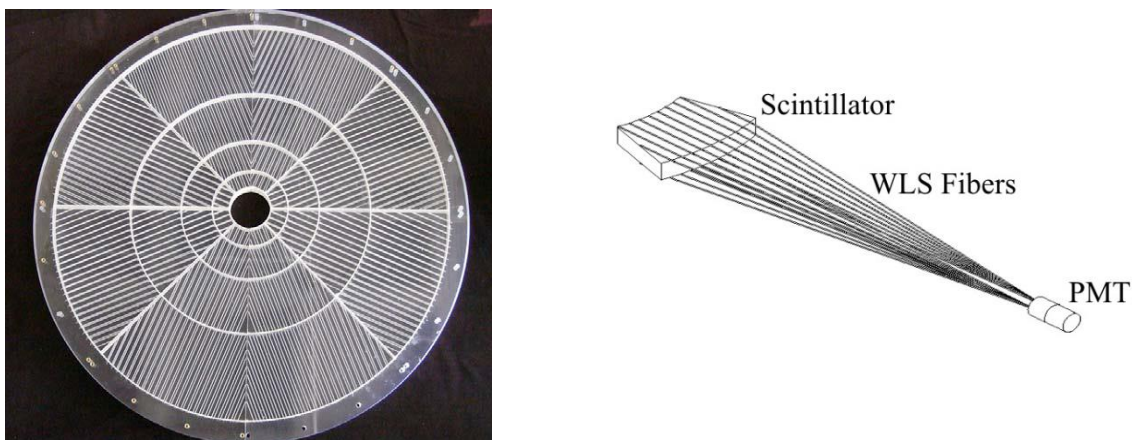


Figura 2.2. A la izquierda se muestran las divisiones de las 32 celdas para el detector V0A; a la derecha un esquema de cómo están incrustadas las fibras en el plástico centellador.

-
- 1 Multiplicidad se refiere al número de partículas cargadas producidas en una colisión.
 - 2 Muchas de las interacciones en un colisionador de hadrones ocurren entre quarks y gluones de baja energía, por tanto no generan estados de masa elevada. Los sistemas de disparo y adquisición de datos de los detectores están optimizados para filtrar estos procesos utilizando lo que se llama un sesgo mínimo o minimum – bias.

Otras características del detector son:

- Plástico centellador Bicron BC404.
- Fibras corredoras de frecuencia Bicron WLS BCF9929AMC con 1 mm de diámetro.
- Las fibras corredoras de frecuencia están acopladas directamente al PMT.

El detector V0A se instaló en ALICE en Julio del 2008 con una resolución temporal de ~ 0.6 ns, cubre un rango de pseudorapidez³ (η) de $2.8 < \eta < 5.1$ para colisiones en el vértice ($z=0$). La cobertura de pseudorapidez de cada anillo se da en la Tabla 1 [8].

Anillo	η_{\max}/η_{\min}	$\theta_{\max}/\theta_{\min}$	r_{\max}/r_{\min}
0	5.1/4.5	0.7/1.3	4.3/7.5
1	4.5/3.9	1.3/2.3	7.7/13.7
2	3.9/3.4	2.3/3.8	13.9/22.6
3	3.4/2.8	3.8/2.9	22.8/41.2

Tabla 1: Pseudorapidez y aceptancias angulares (grados) y la cobertura de radio (cm) para cada anillo del V0A.

La resolución temporal para cada sector de V0 se muestra en la Figura 2.3 junto con su desviación estándar asociada.

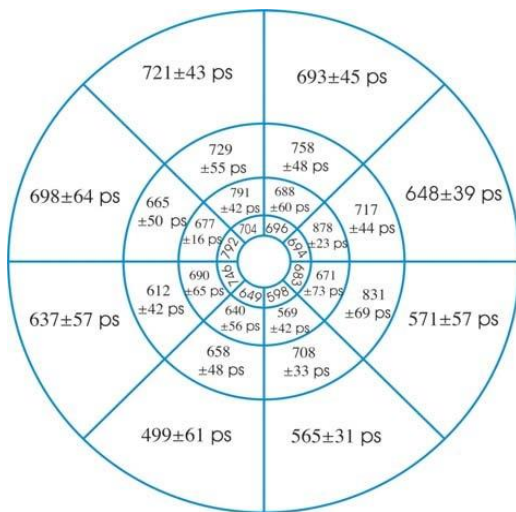


Figura 2.3. Valores promedio de la resolución temporal en cada celda del detector.

3 Coordenada espacial que describe la desviación de una partícula respecto al eje del haz, está determinada por $\eta = -\ln [\tan (\theta/2)]$, donde θ es el ángulo entre el momento lineal P y el eje del haz.

2.2 Construcción de V0-plus

2.2.1. Actualización

Para la actualización V0-plus se espera una modificación tanto en diseño como en los materiales utilizados para la construcción del detector y análisis de datos que cumplan con ciertas características. Esta actualización está programada para el 2018, con lo cual se llevaran a cabo diferentes diseños de prototipos, siendo el de este trabajo el primero de ellos.

Las actualizaciones se enfocan en lo siguiente:

- Resolución temporal a nivel de 200 ps.
- Mejor resolución de amplitud.
- Mejor discriminación de ruido.
- Alta eficiencia para el disparo en Minimum Bias.
- Eliminar o reducir el pulso de retraso del PMT.
- Reducir el deterioro de los PMT's.
- Usar los mismos módulos electrónicos que T0-plus.
- Diseño compacto.

Se considera usar SiPM (Silicon Photomultiplier) que requieren una alta eficiencia de recolección de fotones. Así que es importante realizar pruebas para definir el diseño, los materiales, foto-sensores y la electrónica que será utilizada.

2.2.3. Diseño

La propuesta de diseño para V0-plus consiste en el uso de fibras ópticas claras (de 1mm de diámetro) acopladas ópticamente en el plástico centellador (de 2.5 a 3.0 cm de grosor) como una matriz con el objetivo de obtener una respuesta uniforme del volumen. Las fibras estarán acopladas perpendicularmente a la superficie del disco (paralelas al haz) y distribuidas a lo largo de los módulos de centelleo. Mientras que por el otro extremo, las fibras estarán acopladas a los foto-sensores. Este diseño debe ser compacto ya que se depende del espacio disponible en ALICE.

2.2.4. Prototipo

Basados en lo anterior, el diseño del prototipo resulta en un cubo de $6 \times 6 \times 2.5 \text{ cm}^3$. Sobre su superficie están pegadas 144 fibras ópticas claras que tienen una longitud aproximada de 50 cm y un diámetro de 1mm, se encuentran separadas entre ellas por una distancia de 0.5cm que va centro a centro. Ambos lados de cada fibra se encuentran pulidos, logrando así acoplar el extremo suelto de las fibras a un PMT arreglándolos en forma de atado (bundle) (Fig 2.4).

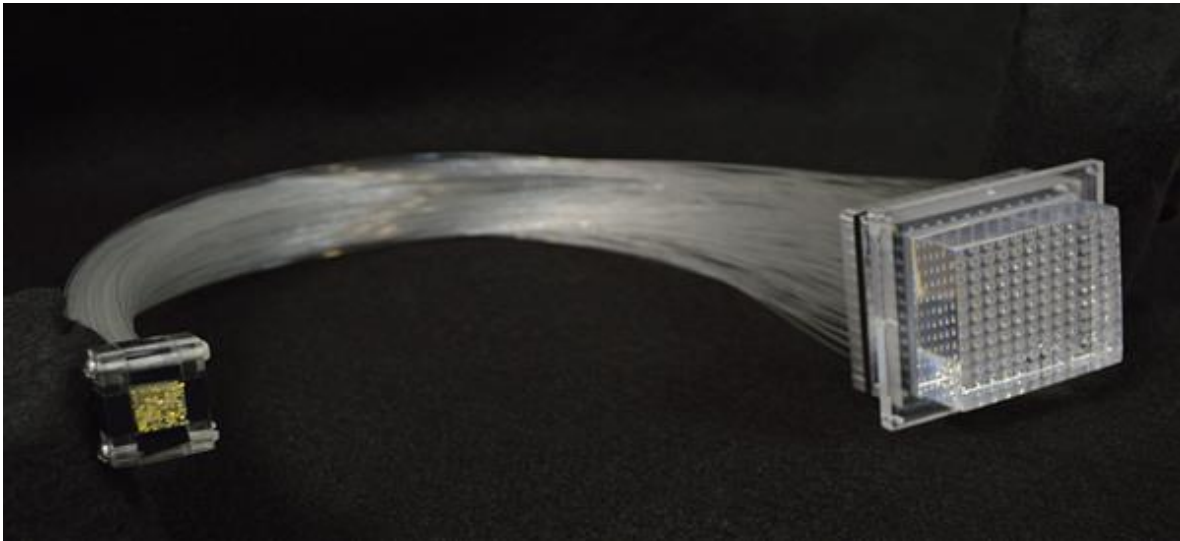


Figura 2.4. Prototipo V0+.

Como parte del prototipo se diseñó un soporte mecánico compuesto de acrílico que sirve como apoyo para las fibras y como base para el centellador, de modo que al maniobrar con el detector resulte cómodo y no se dañe su estructura. También se diseñaron piezas de acrílico para la ayuda del pegado de fibras en el centellador, las cuales están formadas por una matriz de 12×12 perforaciones de 1mm de diámetro.

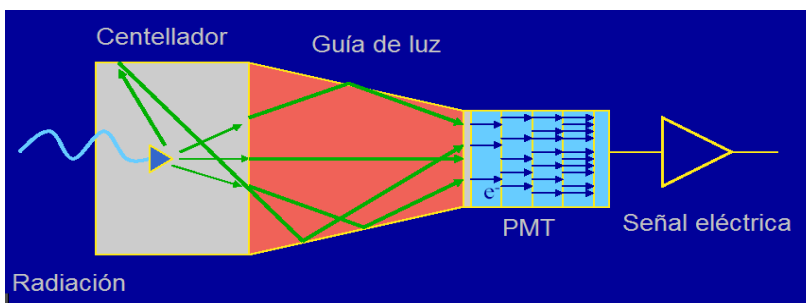
Para este primer prototipo se realizaron dos métodos de pegado de las fibras, un método es sobre la superficie del centellador formando un arreglo de 12×12 y otro que consiste en la perforación de la superficie del plástico centellador igualmente en un arreglo del mismo tamaño resultando 144 perforaciones, en cada orificio se inserta y pega el extremo de cada fibra, logrando así una mejor resistencia mecánica. Más detalles de ambos diseños se darán a conocer en la construcción.

Los materiales para la construcción del nuevo diseño V0+ son:

- Centelladores plásticos orgánicos Bicron BC404.
- Fibras ópticas claras Bicron BCF208 single cladding.
- Fibras ópticas centelladoras.
- Fotomultiplicadores Photonis XP2020.

2.2.4.1. Detector de centelleo.

Un detector de centelleo es aquel que detecta fotones de luz como respuesta a la radiación incidente en un material centellador. Esta luz pasa a través de un tubo fotomultiplicador convirtiéndola en una señal eléctrica por efecto fotoeléctrico. El centellador y el PMT están acoplados mediante una guía de luz, fibras ópticas o directamente al PMT. La luz emitida por el centellador es recolectada por la guía de luz y llevada hasta el fotomultiplicador y éste la convierte en una señal amplificada (entre 10^7 y 10^{10} electrones) que es colectada y analizada. En la siguiente Figura 2.5 se muestran los



componentes básicos de un detector de centelleo.

Figura 2.5. Componentes de un detector de centelleo.

2.2.4.2. Centellador

Los materiales de centelleo exhiben la propiedad de luminiscencia cuando son expuestos a radiación ionizante, etc. Este fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con la materia y excita un gran número de átomos, los cuales al volver a su estado inicial se desexcitan emitiendo fotones con longitud de onda cercano al visible.

La mayoría de los materiales transparentes producen una pequeña cantidad de luz de centelleo cuando sobre ellos incide radiación ionizante. Sin embargo, en algunos pocos la conversión de energía de excitación a luz es eficiente, a estos los llamamos materiales centelladores. En ellos podemos distinguir dos procesos de emisión de luz fluorescencia y fosforescencia.

Por un lado, la fluorescencia es un proceso “instantáneo”, hablando en una escala de tiempos de transiciones atómicas. Este fenómeno ocurre cuando la emisión de luz es del orden de 10^{-8} segundos posteriores a la interacción de la radiación con el material. Por otro lado, si la emisión es retardada al proceso lo llamamos fosforescencia. El retardo es generado porque la excitación de la radiación incidente dio lugar a un estado metaestable, entonces la emisión puede tardar minutos o hasta horas, dependiendo del material.

Existen dos tipos de centelladores, los orgánicos y los inorgánicos. En éste trabajo sólo mencionaremos los orgánicos. Los centelladores orgánicos se conforman de un material centellador, llamado en forma coloquial flúor debido a que este es el responsable de la fluorescencia, disuelto en un solvente base.

Los compuestos centelladores son hidrocarburos aromáticos, es decir, compuestos que contienen átomos de carbono ligados entre sí en forma de anillo. Entre los más utilizados podemos mencionar a PTP, BPBD, PPO y POPOP. Sus fórmulas químicas son respectivamente $C_{18}H_{14}$, $C_{24}H_{22}N_2O$, $C_{15}H_{11}NO$ y $C_{24}H_{16}N_2O_2$, son materiales ricos en carbono e hidrógeno.

Los materiales centelladores se componen de una mezcla de dos de estos compuestos, en donde uno de ellos es el centellador primario y el otro el denominado wavelength shifter. El primero, del orden de 20 veces más concentrado que el segundo, posee emisión en el espectro UV (300-370 nm). El segundo, absorbe los fotones UV y los reemite en longitudes de onda más largas, lo cual puede ser deseable por dos motivos: para ajustar los fotones con la respuesta espectral del fotocátodo y para disminuir la absorción de estos por el mismo centellador.

Una gran categoría de centelladores orgánicos están basados en moléculas con ciertas propiedades de simetría las cuales dan lugar a lo que es conocido como una estructura de electrones π , los niveles de energía de tal molécula se ilustran en la Fig. 2.6. Una serie de estados singletes (spín 0) son llamados S_0 , S_1 , S_2 ,... en la Figura. Un conjunto similar de tripletes (spín 1) son mostrados como T_1 , T_2 , T_3 ,... Para las moléculas de interés como los centelladores orgánicos los espacios de energía entre S_0 y S_1 es 3 o 4 eV, mientras el espacio entre estados más altos son comúnmente más pequeños. Cada una de esas configuraciones electrónicas están subdivididas en una serie de niveles con espacios mucho más finos que corresponden a estados vibracionales de la molécula. Un segundo subíndice es a menudo añadido para distinguir esos estados vibracionales y el símbolo S_{00} representa el estado vibracional más bajo. Muy cerca a temperatura ambiente todas las moléculas están en el estado S_{00} .

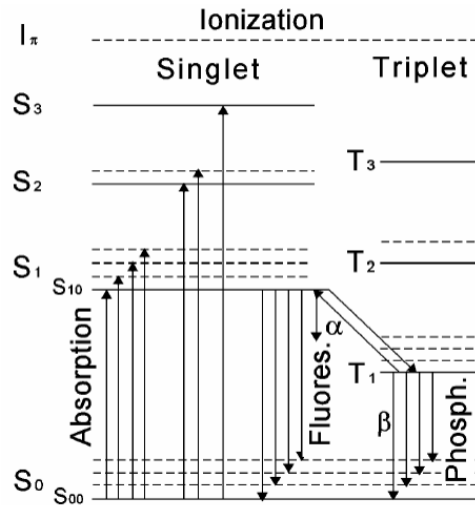


Figura 2.6. Niveles electrónicos de una molécula orgánica con estructura de electrón π .

En el caso del centellador, este proceso representa la absorción de energía cinética de una partícula cargada que pasa cerca.

El mecanismo de centelleo es el siguiente:

- Cuando una partícula cargada pasa cerca de la molécula, ésta absorbe energía cinética de dicha partícula y excita a los electrones de la molécula. En la Figura 2.6 la absorción de energía hecha por la molécula está representado por flechas señalando hacia arriba.
- El estado singlete más alto que esta excitado es desexcitado, en el orden de picosegundos, por medio de conversión interna sin radiación.
- Los estados S_{11} y S_{12} tienen energía vibracional en exceso y no están en equilibrio térmico con las moléculas vecinas, así que rápidamente pierden energía.
- Después en un corto periodo de tiempo despreciable, se produce una población de moléculas excitadas en el estado S_{10} debido al efecto neto del proceso de excitación.
- La luz de centelleo principal (fluorescencia) es emitida en transiciones entre el estado S_{10} y uno de los estados vibracionales del estado electrónico base. Estas transiciones están indicadas por flechas apuntando hacia abajo en la Figura 2.6.
- La intensidad de la fluorescencia a un tiempo t después de la excitación es descrita

por

$$I = I_0 e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (1)$$

Donde τ es el tiempo de decaimiento (decay time) de la fluorescencia y es del orden de ns.

- Mediante una transición llamada cruce entre sistemas algunos estados singlete excitados pueden ser convertidos a estados tripletes. El tiempo de vida de T_1 puede ser de ms y la radiación emitida en una desexcitación de T_1 a S_0 es por tanto una emisión de luz retrasada caracterizada como fosforescente. Como T_1 se encuentra por debajo de S_1 , la longitud de onda de esta fosforescencia será más larga que la longitud de onda de la luz de la fluorescencia.
- Todas las emisiones fluorescentes (menos $S_{10} \rightarrow S_{00}$) tienen una energía más baja que el mínimo requerido para la absorción. Hay una pequeña superposición entre el espectro de emisión y absorción (Fig. 2.7), sin embargo la mayoría de la luz emitida pasa derecho a través del medio de centelleo.

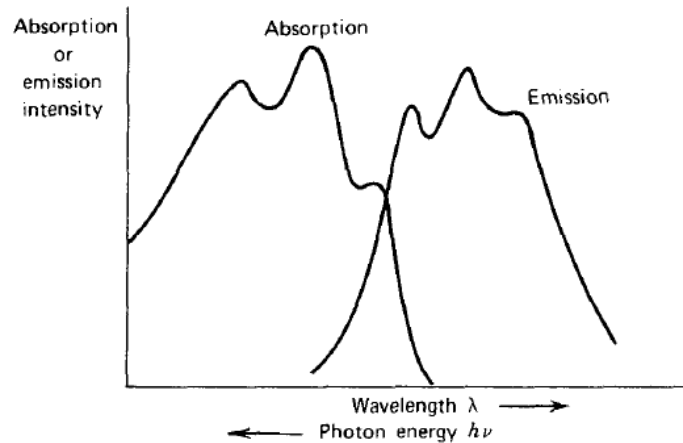


Figura 2.7. Espectro de emisión y absorción óptica para un centellador orgánico típico con estructura de nivel mostrado en la figura anterior.

Si un centellador orgánico es disuelto en un solvente que puede ser después polimerizado, el equivalente de una solución sólida puede ser producida. Un ejemplo común es un solvente que consiste de un monómero de estireno en el cual un centellador orgánico adecuado es disuelto. El estireno es entonces polimerizado para formar un plástico sólido.

Otros moldes plásticos pueden consistir de poliviniltolueno o de polimetacrilato de metilo.

El tiempo de respuesta de los centelladores orgánicos les permite obtener información sobre los tiempos entre eventos con gran precisión. Por otra parte, debido a que tiene un decaimiento rápido, el tiempo muerto del detector y la electrónica, en el cual no pueden discriminar el arribo de una nueva partícula, resultan mucho más viables que los inorgánicos; resultando adecuados cuando se busca obtener respuestas rápidas o altas tasas de conteo.

Los plásticos centelladores resultan más nobles para su manejo y adaptación, estas son algunas razones por las cuales el detector esta hecho de plástico centellador orgánico.

A continuación se muestran los datos técnicos de algunos centelladores de la marca Bicron y el espectro de emisión (Figura 2.8) para el centellador BC-404 que es el de interés (Tabla 2).

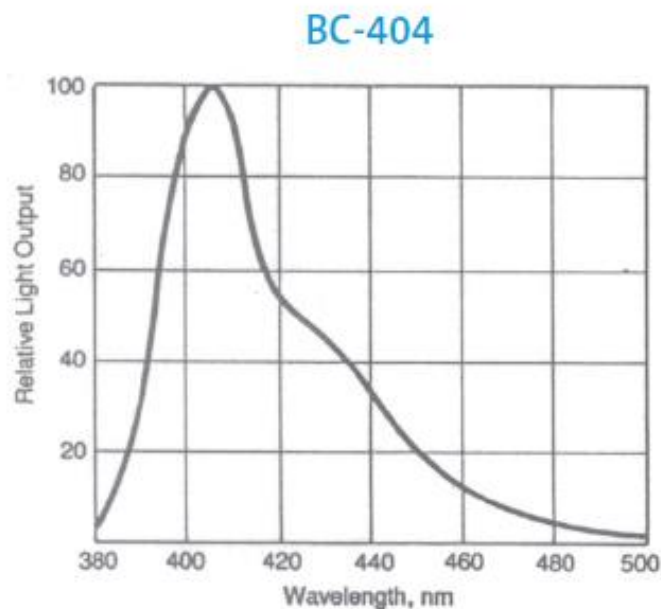


Figura 2.8. Espectro de emisión del centellador BC-404.

Physical Constants of SGC Plastic Scintillators									
Scintillator	Light Output % Anthracene ¹	Wavelength of Maximum Emission, nm	Decay Constant, Main Component, ns	Bulk Light Attenuation Length, cm	Refractive Index	H:C Ratio	Loading Element % by weight	Density	Softening Point °C
BC-400	65	423	2.4	250	1.58	1.103		1.032	70
BC-404	68	408	1.8	160	1.58	1.107		1.032	70
BC-408	64	425	2.1	380	1.58	1.104		1.032	70
BC-412	60	434	3.3	400	1.58	1.104		1.032	70
BC-414	68	392	1.8	100	1.58	1.110		1.032	70
BC-416	38	434	4.0	400	1.58	1.110		1.032	70
BC-418	67	391	1.4	100	1.58	1.100		1.032	70
BC-420	64	391	1.5	110	1.58	1.102		1.032	70
BC-422	55	370	1.6	8	1.58	1.102		1.032	70
BC-422Q	11	370	0.7	<8	1.58	1.102	Benzephenone,0.5%*	1.032	70
BC-428	36	480	12.5	150	1.58	1.103		1.032	70
BC-430	45	580	16.8	NA	1.58	1.108		1.032	70
BC-436	52	425	2.2	NA	1.61	0.960 D:C	Deuterium,13.8%	1.130	100
BC-440	60	434	3.3	400	1.58	1.104		1.032	99
BC-440M	60	434	3.3	380	1.58	1.104		1.039	100
BC-444	41	428	285	180	1.58	1.109		1.032	70
BC-452	32	424	2.1	150	1.58	1.134	Lead,5%	1.080	60
BC-454	48	425	2.2	120	1.58	1.169	Boron,5%	1.026	60
BC-480	**	425	–	400	1.58	1.100		1.032	70
BC-482A	QE=86	494	12.0	300	1.58	1.110		1.032	70
BC-490	55	425	2.3	NA	1.58	1.107		1.032	70
BC-498	65	423	2.4	NA	1.58	1.103		1.032	70

¹ Anthracene light output = 40-50% of NaI(Tl) * 0.1 to 5 weight % also available ** Ratio of Cerenkov light to scintillator light = 10:1

Tabla 2. Datos técnicos para centelladores de la marca Bicron.

2.2.4.3 Poder de frenado

Como hemos visto, cuando partículas cargadas se mueven a través de la materia interactúan con electrones y átomos del material. La interacción ioniza o excita a los átomos. Esto lleva a la partícula que viaja perder energía. La fórmula de Bethe – Bloch describe la energía perdida por medio de la distancia recorrida de partículas cargadas rápidas que atraviesan la materia.

Si consideramos la energía específica depositada por un ion de carga z (en unidades de e), que atraviesa un material centellador con densidad de material ρ , número atómico Z , número másico A y energía de excitación media I , entonces obtenemos:

$$-\frac{dE}{\rho dx} = K \frac{1}{\beta^2} \frac{Z}{A} \varepsilon^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (2)$$

Donde:

$$K = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1} \quad (3)$$

$\frac{dE}{\rho dx}$ – pérdida de energía de la partícula incidente por unidad de espesor másico del material.

$r_e = 2.817 \times 10^{-13} \text{ cm}$ – radio clásico del electrón.

$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ - masa del electrón.

$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ – número de Avogadro.

$\beta = \frac{v}{c}$ de la partícula incidente.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - \text{factor de Lorentz.} \quad (4)$$

δ – corrección de densidad.

C – corrección de capas.

Y con la energía máxima cedida al electrón en una colisión como:

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\frac{m_e}{M} \sqrt{1 + \beta^2 \gamma^2} + \frac{m_e^2}{M^2}} \quad (5)$$

Si $M \gg m_e$ entonces:

$$T_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \quad (6)$$

El mayor problema asociado con los centelladores plásticos es su comportamiento no lineal. Es decir, la salida de luz por unidad de longitud tiene una dependencia no lineal en la energía perdida por unidad de longitud de la trayectoria de la partícula. Este comportamiento es caracterizado por la llamada fórmula de Birks [9], [10].

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A dE/dx}{1 + k dE/dx} \quad (7)$$

Donde dL/dx representa la salida de luz por unidad de longitud, dE/dx es la energía perdida por la partícula por unidad de longitud de su camino, A es la eficiencia absoluta de centelleo, y k es un parámetro que relaciona la densidad de los centros de ionización con la

energía perdida. dE/dx es usualmente determinada por la fórmula de Bethe – Bloch (2).

Cuando partículas pasan a través de centellador estos pierden energía con razón dada por la fórmula (2). La energía perdida por las partículas no solo va excitando moléculas también va incrementando las vibraciones de la red. La desexcitación de las moléculas lleva a la emisión de fotones de centelleo con una alta probabilidad. Ahora, si aumentamos el poder de frenado (por ejemplo incrementando la energía de las partículas incidentes), más moléculas se excitaran por unidad de longitud de trayectoria, esto producirá más luz de centelleo. Pero este comportamiento puede no persistir indefinidamente mientras la muestra tiene un número finito de moléculas que pueden ser excitadas. En este estado se puede decir que la muestra ha alcanzado un estado de saturación. Después de alcanzar este estado, ceder más energía al material no aumentaría la salida de luz. Lo anterior es referido a la ley de Birks y es matemáticamente representado por la fórmula (7).

El comportamiento de la luz de salida con respecto al poder de frenado es representado por (7) y gráficamente descrito en la siguiente Figura 2.9.

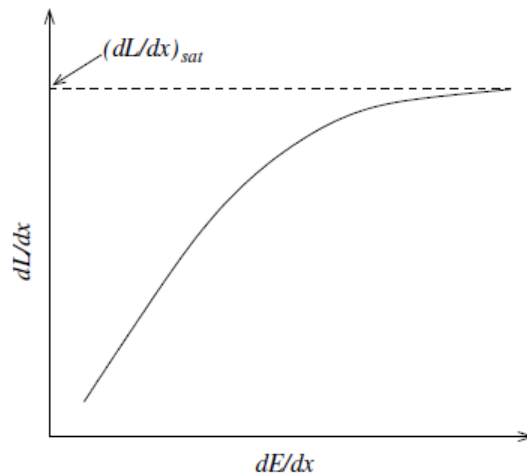


Figura 2.9. Gráfico de la fórmula de Birks en unidades arbitrarias. El efecto de saturación de la salida de luz es llamada la ley de Birks.

2.2.4.4. Guías de luz

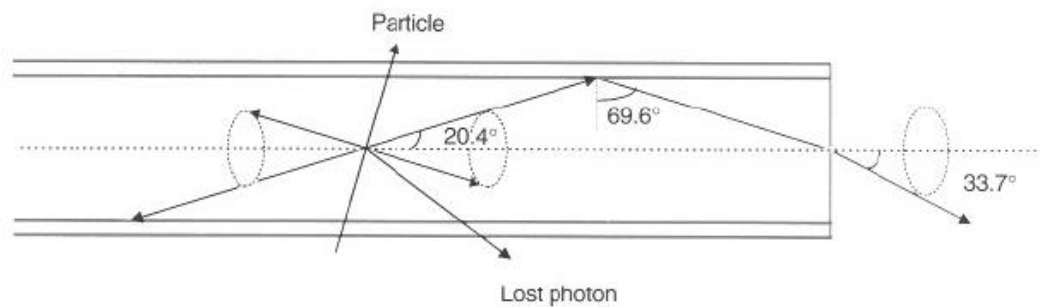
Con el objetivo de que al fotomultiplicador le llegue la mayor cantidad de luz de centelleo, es conveniente utilizar fibras ópticas como guías de luz.

Las fibras ópticas están compuestas de un núcleo (core) y revestimiento (cladding), algunas llegan a tener doble cladding aumentando la luz hasta en un 50% debido a que tienen una mejor eficiencia de captura. Cuando adaptamos una fibra óptica a un centellador, es que, la luz producida por el centellador entra en la fibra óptica y ésta, por reflexión total interna, no deja escapar la luz debido a que su revestimiento tiene un índice de refracción menor a el núcleo de la fibra, guiándola así hasta el fotomultiplicador (Fig. 2.10). Existen fibras redondas y fibras cuadradas, ambas se muestran en la siguiente Figura 2.11.

Cladding and Transmission Mechanism

Single Cladding

Single cladding is standard type of cladding.



Multi Cladding

Multi cladding fiber (M) has 50% higher light yield than single cladding fiber because of large trapping efficiency.

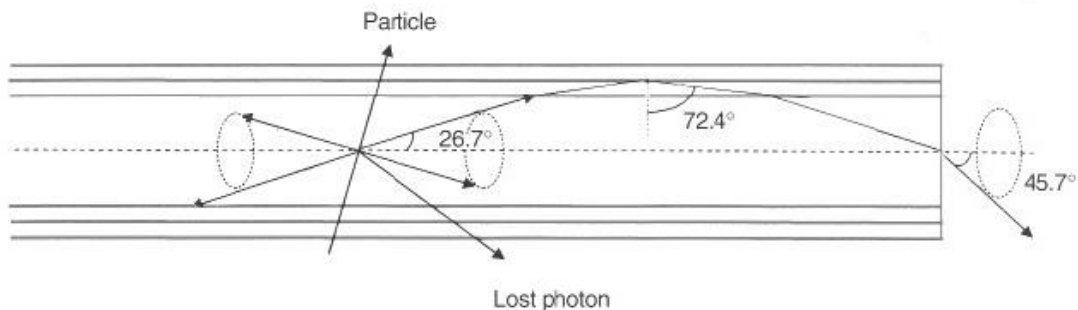


Figura 2.10. Mecanismo de transmisión de luz en una fibra con single cladding (arriba) y con multi cladding (abajo).

Cross-section and Cladding Thickness

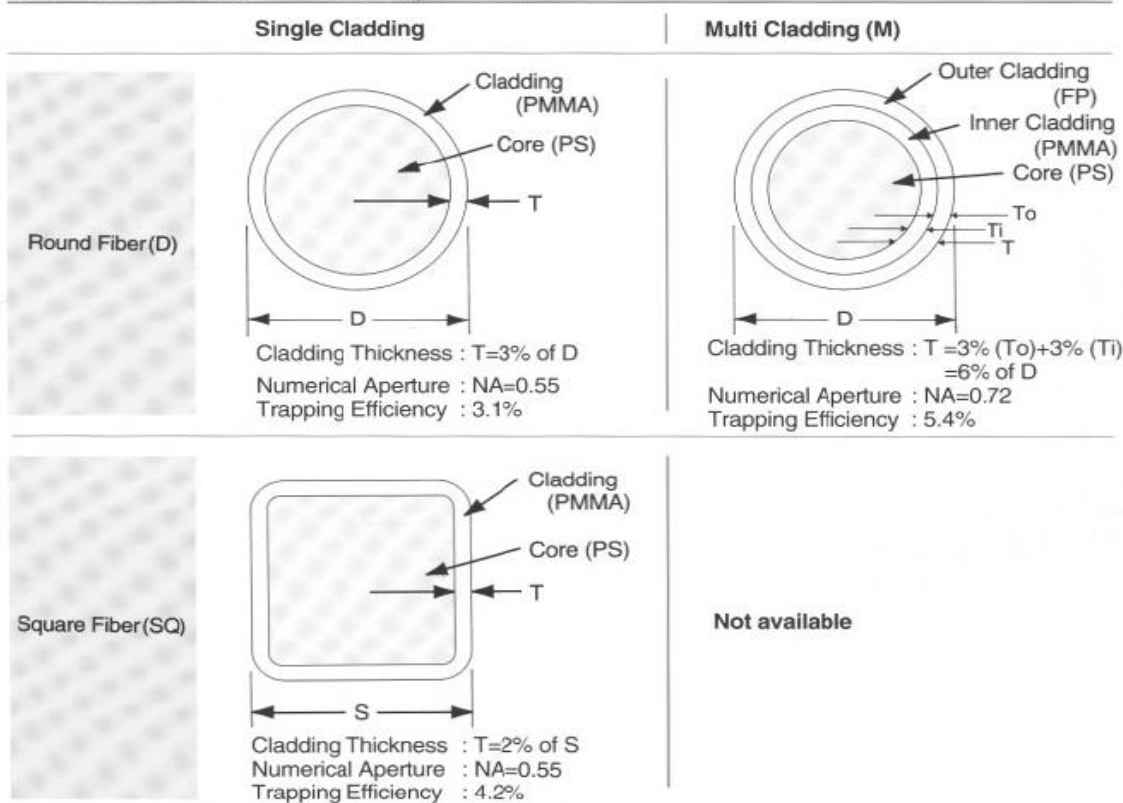


Figura 2.11. Sección transversal y cladding de las fibras.

2.2.4.5. Fotomultiplicador

El fotomultiplicador nos proporcionará información útil convirtiendo la luz de centelleo en una señal eléctrica.

Un PMT cuenta con un foto-cátodo, el cual libera electrones cuando sobre él inciden fotones visibles, llamados foto-electrones; y con un arreglo de dínodos, encargados de la multiplicación de los foto-electrones. Éstos se encuentran en el interior del tubo fotomultiplicador al vacío.

El foto-cátodo es una fina capa de material fotosensible, donde su función es liberar la mayor cantidad de electrones posibles después de la incidencia de fotones. Cuando un fotón incide en él, transfiere su energía a un electrón del material, alrededor de 3 eV para un

centellador con emisión en la región azul-violeta. De ésta manera el electrón desprendido escapa del material, si tiene energía suficiente para superar la barrera energética a la interface material-vacío, e incide en un primer dínodo arrancando electrones secundarios del material. Entonces, algunos de estos electrones pasarán al siguiente dínodo donde seguirán el mismo mecanismo hasta llegar al dínodo final llamado, ánodo. Éste es el destino de los electrones y tiene un potencial positivo, atrayendo a los electrones.

Para que el electrón liberado en figel foto-cátodo sea atraído por el dínodo, este debe estar a mayor potencial que aquel. Igualmente el segundo dínodo y así sucesivamente, donde el ánodo posee el mayor potencial.

El fotomultiplicador XP2020 de PHOTONIS (Fig. 2.12) tiene las características que se muestran en la siguiente hoja de datos técnicos (Tabla 3).



Figura 2.12. Fotomultiplicador XP2020, PHOTONIS.

Podemos darnos cuenta de que el centellador y el fotomultiplicador emiten en el mismo rango de longitud de onda, maximizando la ganancia.

Description				
Window material	Borosilicate glass			
Photocathode	Bi-alkali			
Refr. Index at 420nm	1.48			
Multiplier structure	Linear focused			
Photocathode characteristics	Min	Typ	Max	Unit
Spectral range :		270-650		nm
Maximum sensitivity at :		420		nm
Sensitivity :				
Luminous :		70		$\mu\text{A/lm}$
Blue * :	7.5	10		$\mu\text{A/lmf}$
Radiant, at 420nm		80		mA/W
Characteristics with voltage divider A	Min	Typ	Max	Unit
Gain slope (vs supp. Volt., log/log)		9		
For a gain of		3×10^7		V
Supply voltage *	1750	2000	2600	V
Anode dark current *		10	100	nA
Background noise *		900	2500	cps
Single electron spectrum resolution		70		%
Peak to valley ratio		2.5		%
Pulse amplitude resolution for ^{137}Cs		7.2		%
Gain halved for a magnetic field of :				
Perpendicular to axis "n" :		0.15		mT
Parallel to axis "n" :		0.12		mT
For a supply voltage of : 2000V	Min	Typ	Max	Unit
Linearity (2%) of anode current up to :		25		mA
Anode pulse :				
Rise time :		1.6		ns
Duration at half height :		3.7		ns
Transit Time :		28		ns
Recommended Voltage Divider				

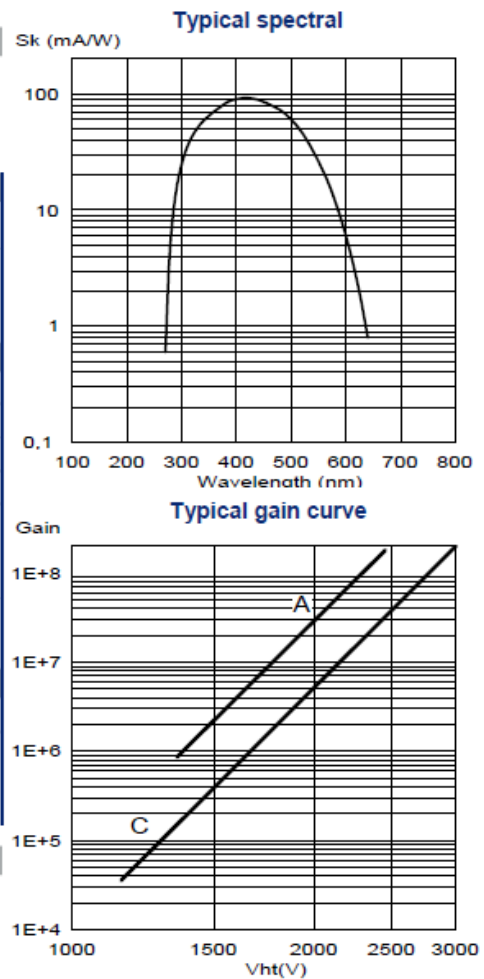


Tabla 3. Características del PMT XP2020.

2.3. Construcción.

La construcción del prototipo para V0-plus se llevó a cabo por estudiantes y académicos del Instituto de Física. Logrando finalizar con dos prototipos, donde las diferencias se basan en el tipo de fibra y el método de pegado de las fibras en el plástico centellador.

Los materiales y equipo utilizados en la construcción y análisis, (las fibras, el plástico centellador, los PMT y la electrónica) son reutilizados ya que en el momento no se contaba con presupuesto para adquirir nuevo equipo. Por esta razón antes de la construcción del

detector se realizó la optimización de los materiales.

Para el primer prototipo, llamado P1, se cortaron 144 fibras claras de aproximadamente 50 cm de longitud, a las que se les realizó una sencilla prueba iluminando el interior de la fibra con un láser para revisar que la fibra no tuviera fisuras por donde pudiera escapar la luz, también se revisaban a través de una lupa. Las fibras que se encontraron en buen estado comenzaron a pulirse por ambas caras sobre una superficie plana, ya que el corte se realizó con una navaja y ésta despostilla el contorno de la fibra dañando su recubrimiento. El proceso para lijar consistió en agrupar fibras entre dos acrílicos dejando aproximadamente 1 mm por fuera como se muestra en la Figura 2.13. Después se humedeció la lija con agua y con movimientos circulares se lijaron las fibras, este proceso se repitió para diferentes lijas. Cuando quedaron pulidas por ambas caras, nuevamente eran examinadas a través de la lupa, si se encontraba alguna fibra mal pulida se repetía el proceso. Las fibras bien pulidas emitían mucho más luz que las no pulidas al colocarlas frente a una fuente de luz y eran uniformes en su superficie, sin pequeñas películas de recubrimiento desprendidas de la fibra.

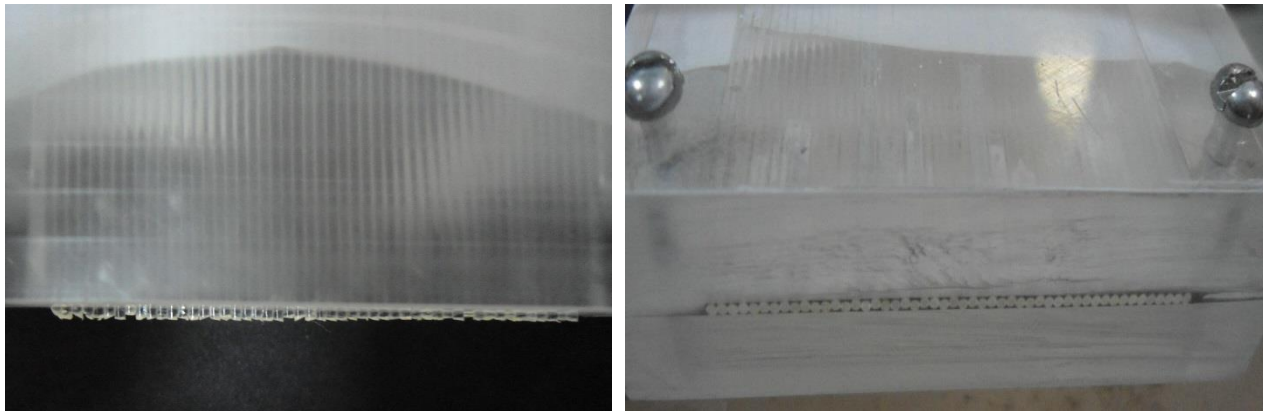


Figura 2.13. A la izquierda se muestran las fibras alineadas entre dos placas de acrílico para llevar a cabo su pulido. Mientras que a la derecha se observan las fibras pulidas.

El plástico centellador también se pulió, con el mismo método que las fibras, por todas sus caras para eliminar los deterioros de la superficie y los desperfectos realizados al cortar el centellador. Para dar el mejor acabado posible al final se utilizó compuesto de micro diamante y una manta para pulir, con esto se logró la transparencia en el centellador realizando movimientos circulares y durante tiempos prolongados. En la siguiente Figura 2.14 vemos el centellador antes y después de haber sido pulido por el compuesto de micro diamante, nótese que la diferencia es muy notoria.

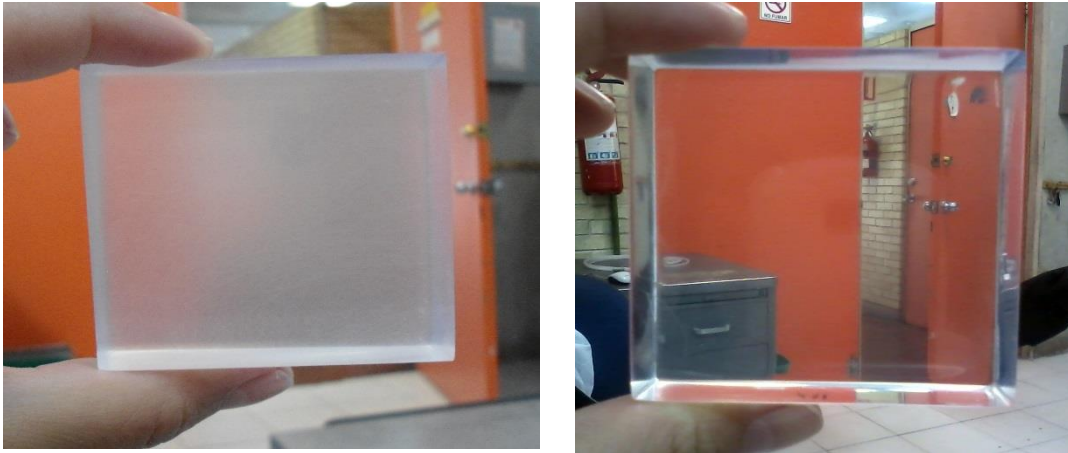


Figura 2.14. A la izquierda centellador antes de pulirse con micro-diamante, a la derecha centellador finalmente pulido con ayuda del micro-diamante.

Para la recolección de luz generada por el centellador se pegaron fibras sobre la superficie del plástico centellador. Pero para esto en primer lugar se efectuó una prueba de pegado con materiales iguales a los del prototipo con el objetivo de verificar que todas las piezas diseñadas para optimizar la adhesión de las fibras y el centellador funcionaran como se especuló.

Se acomodaron bases de acrílico y de neopreno, una sobre otra, perforadas en forma de una matriz de 144 orificios (12x12) como se muestra en la Figura 2.15. El neopreno ayudará a que las fibras se mantengan fijas, mientras que las placas de acrílico sirven como guías al insertar cada fibra. Una por una las fibras fueron insertándose en cada orificio de las bases teniendo cuidado de no romperlas, las fibras quedan al ras de la superficie de la base de abajo quedando así todas a las misma altura y alineadas.

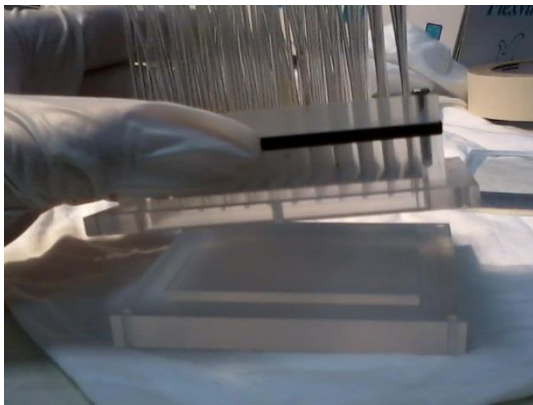


Figura 2.15. Fibras insertadas en las bases de acrílico para después ser pegadas en el centellador.

Una vez que todas las fibras fueron insertadas se desmontó la base de abajo y se sustituyó por otra donde estaba contenido el pegamento óptico, bañando así la punta de las fibras, seguido de ello sustituyó la base por el centellador logrando que las fibras quedaran adheridas a éste, Fig. 2.16.

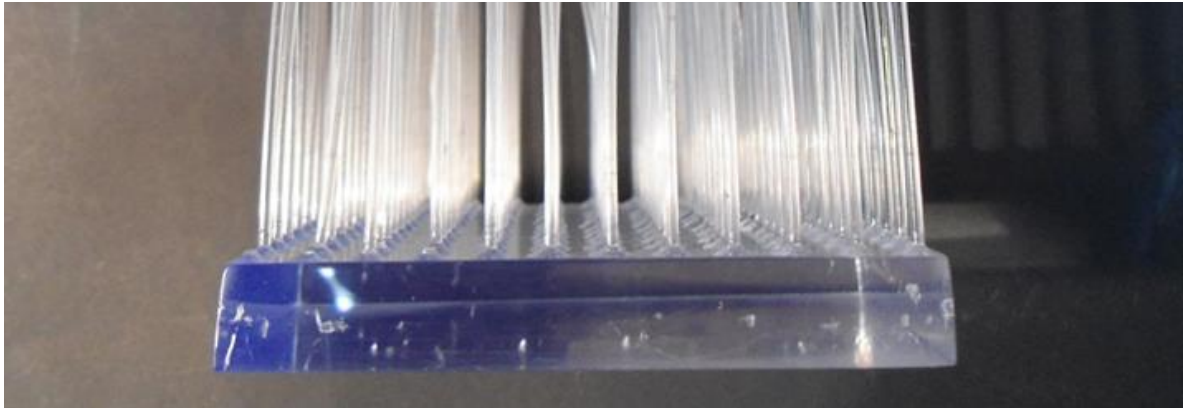


Figura 2.16. Fibras adheridas al centellador.

Esta técnica para el pegado de las fibras resulta muy sensible a la manipulación del detector, ya que como las fibras sólo están adheridas a la superficie cualquier esfuerzo sobre ellas puede despegarlas fácilmente, pero una ventaja es que no reduce el volumen del centellador por tanto se aprovecha al máximo el material y el espacio.

Para el segundo prototipo, nombrado P2, el método de pegado fue similar, sólo que ahora no fue necesario usar las bases ya que el centellador contiene las perforaciones en su superficie para insertar las fibras y pegarlas. Los orificios del centellador son más que suficientes para sostener las fibras y que no se muevan de su posición. Así que, un extremo de las fibras era bañado en pegamento y una por una iban siendo insertadas en cada perforación. Las fibras ópticas que se utilizaron para el prototipo P2 fueron centelladoras y claras debido a que en ese momento no teníamos suficientes fibras claras disponibles. Esta técnica hace al detector más resistente en su manejo, es más difícil que las fibras se desprendan del centellador, pero disminuye el volumen del centellador disminuyendo el número de fotones producidos.

Para ambos prototipos el acoplamiento entre las fibras y el PMT fue el mismo, con ayuda de un bounde, que, básicamente su función es unir todas las fibras en una pequeña área y sujetarlas firmemente. Así que para esto colocamos el centellador y las fibras como se observa en la Figura 2.17. Por uno de los lados huecos del bounde, pegamos temporalmente acetato formando un contenedor para las fibras; cuidadosamente fuimos insertando cada fibra dentro del contenedor acomodándolas y presionando hacia abajo para

que quedaran lo más alineadas posible, una vez que todas las fibras estaban dentro y acomodadas, inyectamos rápidamente pegamento óptico entre las fibras hasta que el contenedor quedo repleto de pegamento óptico.



Figura 2.17. Parte del prototipo posicionado para empaquetar el extremo libre de las fibras.

Cuando el pegamento secó quitamos el acetato y pulimos la superficie formada por el pegamento y las fibras, consiguiendo así que todas las fibras permanecieran alineadas y bien distribuidas para el acoplamiento con el PMT, Fig. 2.18.

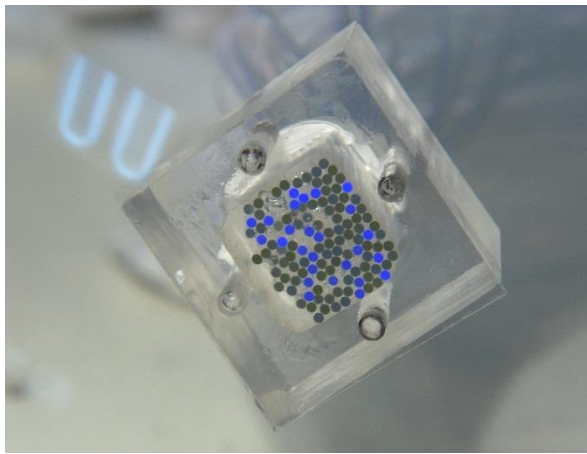
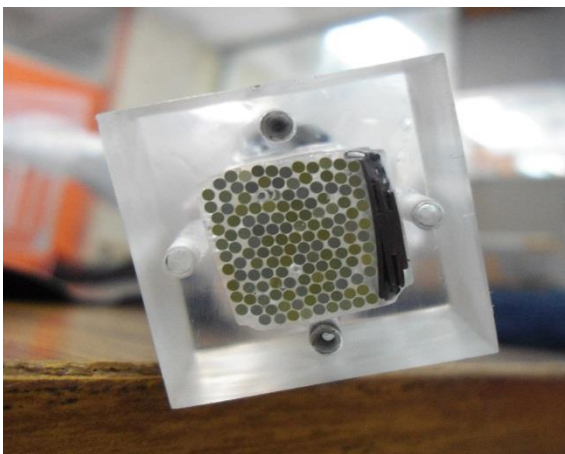


Figura 2.18. A la izquierda el boundle para el prototipo 1 y a la derecha boundle del prototipo 2.

Para colocar al detector en su base primero se colocó un espejo debajo del centellador y después se forro con papel tyvek. Por último acomodamos el detector, como se observa en la Figura 2.19, dentro del soporte. Las fibras se acomodaron una por una dentro de una ranura donde son presionadas para mantenerlas fijas.

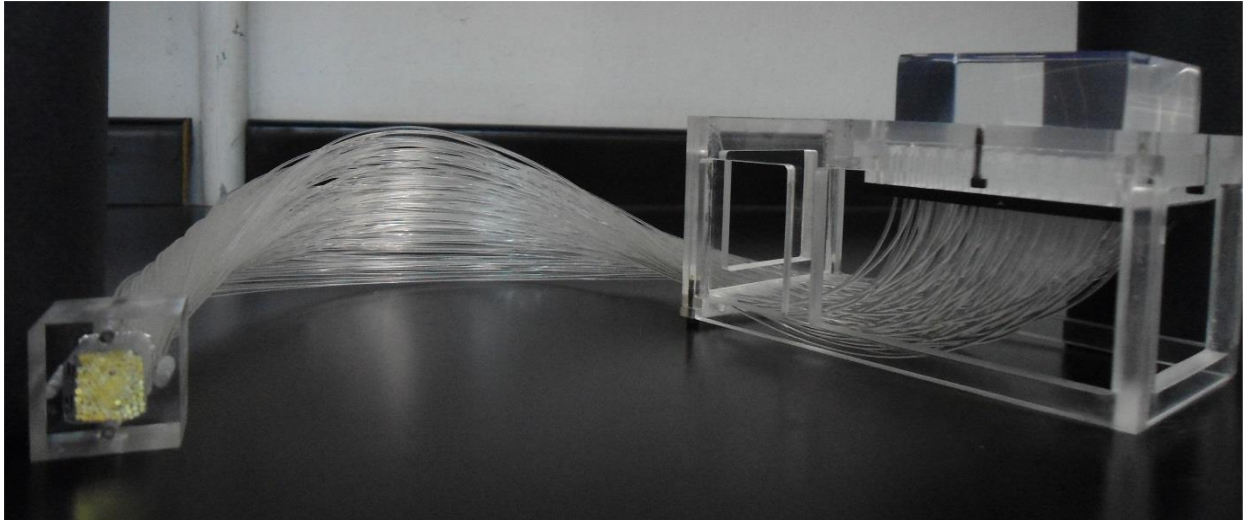


Figura 2.19. Prototipo finalizado montado en su soporte.

Para la toma de datos realizamos pruebas con diferentes reflectores, espejo, tyvek, papel negro y pintura. Cada vez que cambiábamos cualquiera de los tres primeros reflectores sólo teníamos que desmontar la base que contiene al centellador y cambiar el reflector forrando el centellador por todos sus lados. Obviamente la pintura fue la última prueba realizada e igualmente se retiró la base y se pintó el centellador por sus tres caras libres.

2.4. Toma de datos

Los detectores nos brindan información sobre la radiación detectada en forma de un pulso eléctrico. Este pulso debe ser procesado a través de un sistema eléctrico con la finalidad de adquirir toda la información que éste nos está proporcionando. Con dicho sistema se deberán realizar algunas tareas como distinguir señales, extraer información de la energía de radiación incidente, determinar la diferencia temporal relativa entre dos eventos, entre otras, y así tomar decisiones sobre aceptar o no un evento y registrarlo. Para lograr comprender dicho sistema primero revisemos algunos conceptos que serán de utilidad.

2.4.1. Pulsos

La información puede estar contenida en una o más características del pulso como su amplitud, polaridad, forma o su presencia. La Figura 2.20 nos muestra un pulso ideal de voltaje o corriente en función del tiempo. A partir de ésta figura definimos algunos conceptos.

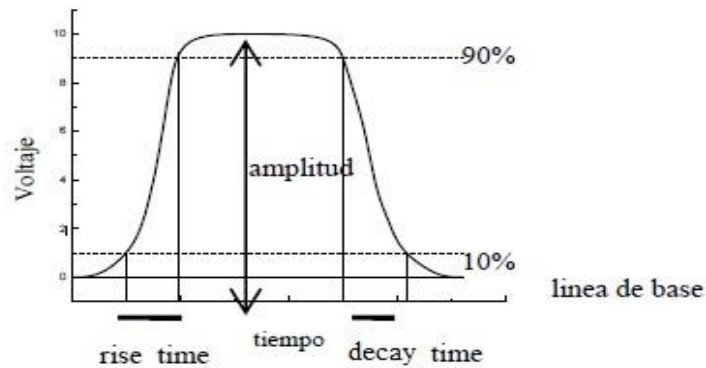


Figura 2.20. Pulso ideal de voltaje y algunos términos usados en electrónica.

Línea de base. La línea base de la señal es el nivel de voltaje al cual el pulso decae. Generalmente es cero, pero es posible que debido a fluctuaciones en la señal o en la tasa de conteo tome un valor distinto.

Amplitud o altura del pulso. La amplitud del pulso es la altura desde el máximo hasta la línea base.

Ancho de señal. Es el ancho de la señal usualmente tomado desde la mitad de la altura.

Rise time o tiempo de subida. Es el tiempo que le toma al pulso crecer del 10% al 90% de su amplitud. Este tiempo determina la rapidez de la señal y es esencial en aplicaciones temporales.

Decay time o tiempo de decaimiento. Se define como el tiempo que le toma al pulso decaer del 90% al 10% de su amplitud. El rise time y el decay time no son necesariamente iguales para un pulso dado.

2.4.2. Señales lineales y lógicas.

Para el procesamiento de señales es importante diferenciar dos tipos de pulsos, el pulso lineal (o analógico) y el pulso lógico (o digital). El pulso lineal contiene información sobre características del pulso, como su amplitud y/o forma y que nos proporciona información sobre la carga o energía depositada en el detector debida a un evento. Una secuencia de pulsos lineales pueden diferir por tanto en su forma o amplitud. Mientras que un pulso lógico es una señal de amplitud y forma constante, que lleva información sólo acerca de su presencia o ausencia, o en el preciso tiempo de aparición. Se utiliza para medir tiempo entre detectores, tomar decisiones sobre el evento (coincidencias) y para controlar el sistema de toma de datos.

Los pulsos lineales son sometidos a varios procesos antes de ser recogidos en un monitor, o incluso pueden ser convertidos en pulsos lógicos con el fin de alimentar una unidad de coincidencias. Por tanto, de las diferentes unidades electrónicas empleadas en el tratamiento de la señal, algunas son dispositivos lineales diseñados para interpretar y proporcionar pulsos lineales, mientras que otros módulos, o parte de estos, son unidades lógicas que analizan la señal de entrada y basándose en ciertos criterios de selección determinan si debe producirse un pulso lógico como salida.

2.4.3. Señales lentas y rápidas.

Las señales lineales y lógicas se pueden dividir en rápidas y lentas. Las señales rápidas se refieren a las señales con un rise time de pocos nanosegundos o menos, mientras que las lentas tienen rise time de cientos de nanosegundos o más. Esta definición incluye las señales lineales y lógicas.

Los pulsos rápidos son muy importantes para aplicaciones temporales y altas tasas de conteo. En estas aplicaciones es indispensable preservar el bajo rise time a lo largo del sistema electrónico. Los pulsos lentos, por el contrario, son generalmente menos susceptibles al ruido y ofrecen una mejor información sobre la altura del pulso para estudios espectroscópicos.

2.4.4. Electrónica NIM

NIM por sus siglas en inglés (Nuclear Instrument Module) es un sistema modular, fue la primera y más simple estandarización establecida para sistemas electrónicos en Física Nuclear. En este sistema, los aparatos electrónicos básicos (amplificadores, contadores, discriminadores, etc.) son construidos en forma de módulos de acuerdo a especificaciones

mecánicas y eléctricas estandarizadas. Estos módulos se conectan en bins, también estandarizados, para proporcionar voltaje a los módulos.

Cualquier módulo NIM puede ser conectado a un bin NIM, logrando crear cualquier sistema electrónico especificado con los módulos electrónicos necesarios, instalándolos en un bin NIM y realizando el cableado adecuado. Los módulos pueden ser fácilmente intercambiados o reemplazados e incluso almacenarlos para futuros experimentos.

2.4.5. Módulos electrónicos para el procesamiento de señales

2.4.5.1. Fan in/out

Es un módulo que contiene dos circuitos, fan - in y fan - out. El fan - out es un circuito activo, el cual permite la distribución de una señal a varias partes de un sistema electrónico dividiendo la señal de entrada a varias señales eléctricas de la misma altura y forma.

El fan - in, por otro lado, acepta varias señales de entrada y entrega la suma algebraica a la salida. Estos módulos pueden ser bipolares, es decir, aceptan señales de ambas polaridades o una única polaridad. Los fan - ins son particularmente utilizados para la suma de salidas de varios detectores o las señales desde un gran detector con muchos foto-multiplicadores.

Ambos, fan - in y fan - out, vienen en dos variedades: lineal y lógica. Los módulos lineales aceptan señales analógicas y lógicas, mientras los fan - in y fan - out lógicos son diseñados para señales lógicas únicamente. En el caso de un fan - in lógico, la suma algebraica es remplazada por una suma lógica.

2.4.5.2. Discriminador

Es un dispositivo el cual responde únicamente a señales de entrada con la altura de un pulso superior a cierto valor umbral. Si este criterio se satisface, el discriminador responde emitiendo una señal lógica estándar; si no, no realiza ninguna respuesta. El más común uso del discriminador es el bloqueo de pulsos de ruido de baja amplitud desde foto-multiplicadores u otros detectores. Buenos pulsos, los cuales deberían en principio ser lo suficientemente grandes para activar el discriminador, son transformados en pulsos lógicos para el procesamiento de futura electrónica. En este papel el discriminador es un simple convertidor analógico a digital.

2.4.5.3. Unidad de coincidencias

La unidad de coincidencias determina si dos o más señales lógicas coinciden en un intervalo de tiempo y generan una señal lógica. Por el contrario si no hay ninguna coincidencia no se generará ninguna señal. Otras puertas lógicas realizan la operación “OR”, el “NOT” y combinaciones de las anteriores.

La unidad de coincidencias es un ejemplo de una clase más general conocida como la puerta lógica. Existen unidades las cuales realizan la equivalencia de las operaciones lógicas Booleanas en las señales de entrada. La unidad de coincidencia, por ejemplo, esencialmente, ejecuta la operación lógica “AND”.

Una versión más sofisticada y flexible de las puertas lógicas descritas anteriormente son las llamadas unidades lógicas mayores. Tales módulos aceptan varios pulsos de entrada y permiten la selección de operaciones lógicas en la entrada.

2.4.5.4. Flash ADC

El ADC es un dispositivo que convierte la información contenida en una señal analógica a una forma digital equivalente. Este instrumento es un lazo fundamental entre la electrónica analógica y digital.

Hay que definir con que exactitud será la conversión entre la señal analógica y la digital, para lo cual se define la resolución que ésta tendrá.

Primero se define el número máximo de bits de salida (la salida digital). Este dato permite determinar el número máximo de combinaciones en la salida digital. Este número máximo está dado por 2^n donde n es el número de bits.

También la resolución se entiende como el voltaje necesario (señal analógica) para lograr que en la salida (señal digital) haya un cambio del bit menos significativo.

Este dispositivo es esencial ya que le transmitirá los datos adquiridos a la computadora donde se guardarán para una lectura posterior.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

En este capítulo daremos a conocer como se llevaron a cabo las pruebas de los detectores. Valoraremos el diseño, la arquitectura y los materiales que se utilizaron en la construcción para establecer las modificaciones necesarias en prototipos posteriores.

3.1. Pruebas

Las pruebas se llevaron a cabo en el IFUNAM con rayos cósmicos. Para la toma de datos, los detectores se colocaron como se ve en la Figura 19, arriba tenemos el prototipo 1 (P1) conectado al fotomultiplicador (PMT1) de base negra con número de serie 025282 y debajo el prototipo 2 (P2) conectado al fotomultiplicador (PMT2) de base gris con número de serie 025284, ambos se encontraban en el interior de una caja negra. Figura 3.1.

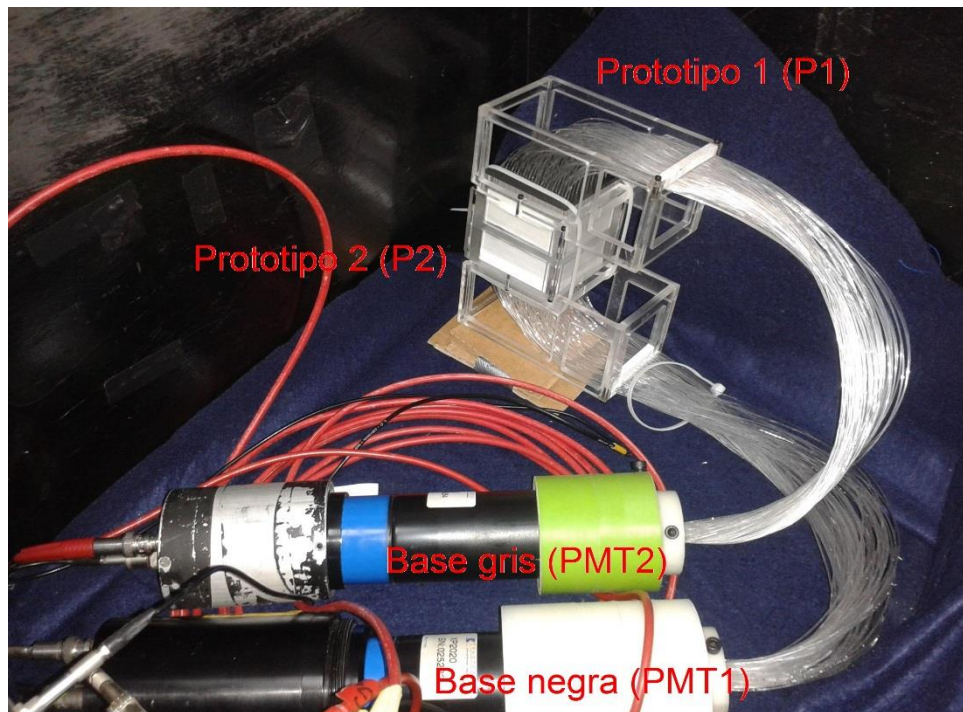


Figura 3.1. Montaje de los prototipos para la toma de datos.

Cada prototipo está acoplado a un fotomultiplicador, de tal forma que tenemos dos señales independientes, estas se conectan al módulo lineal fan – in/fan - out donde se repite cada señal de entrada sin pérdidas por la impedancia dando varias salidas de cada señal. Una de estas salidas se conecta a un canal del discriminador donde sólo se permite el paso de señales con cierto valor determinado por el usuario, la salida es transferida a la unidad de coincidencias, donde sólo se generará una señal de salida cuando las dos señales de entrada se producen un rango de 50 ns. Lo anterior sirve como un trigger (disparo) para el Flash ADC (FADC) que está en el VME, esta señal activará el momento de captura del evento, el cual dura un tiempo determinado para poder registrar las señales originales que salen del módulo fan - in fan - out. Esta descripción se muestra en la Fig. 3.2. Este es el proceso que se llevó a cabo para obtener información sobre cada evento y así enviarlo al FADC donde es almacenado.

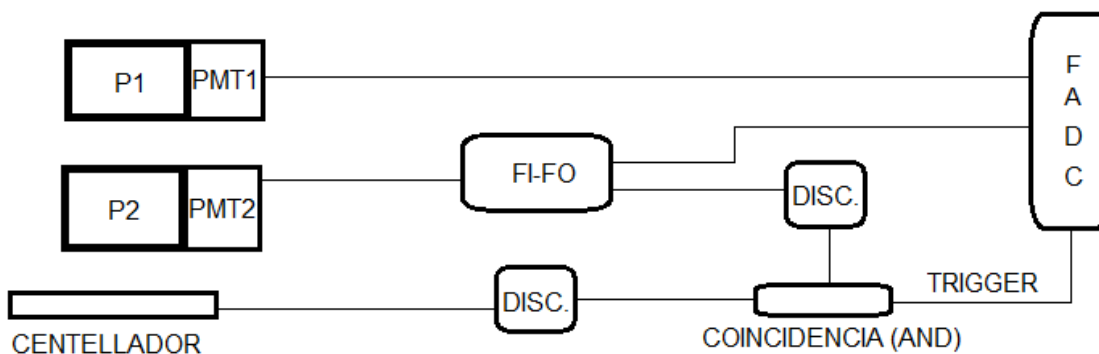


Figura 3.2. Diagrama para la obtención de datos.

3.1.1. Comparación entre fotomultiplicadores.

Realizamos una comparación entre los fotomultiplicadores y los prototipos; esto se logró realizando primero un acoplamiento P1-PMT1, P2-PMT2 y después cambiando los PMT's quedando el arreglo P1-PMT2, P2-PMT1, ambos fotomultiplicadores operaron con el mismo voltaje de 2500. El objetivo aquí fue fijarnos en la ganancia que obtuvimos para ambos prototipos usando diferente PMT.

El resultado es el que muestra en las Figuras 3.3 y 3.4 donde el eje Y es el número de eventos (N) y el eje X es la cantidad de luz colectada por el fotomultiplicador (mV), posteriormente a cada distribución de amplitud se le ajustó una gaussiana para obtener el valor promedio. Cabe mencionar que para rayos cósmicos el ancho de la distribución es más grande que si las pruebas fueran hechas con haz, por tanto lo que mejor se ajusta a los datos es una gaussiana y no alguna otra distribución.

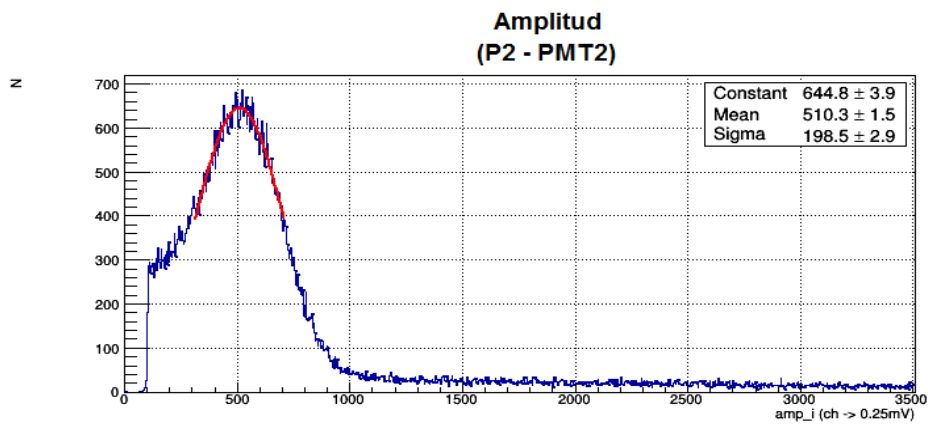
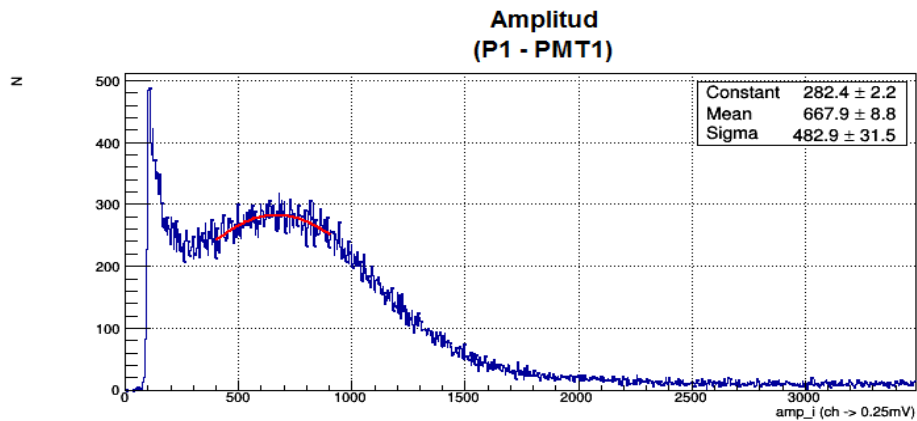


Figura 3.3. El histograma de arriba nos muestra la amplitud con su ajuste gaussiano (línea roja) para el acoplamiento P1-PMT1 (SN: 025282), mientras que el histograma de abajo muestra la amplitud para acoplamiento P2-PMT2 (SN: 025284) con su respectivo ajuste gaussiano.

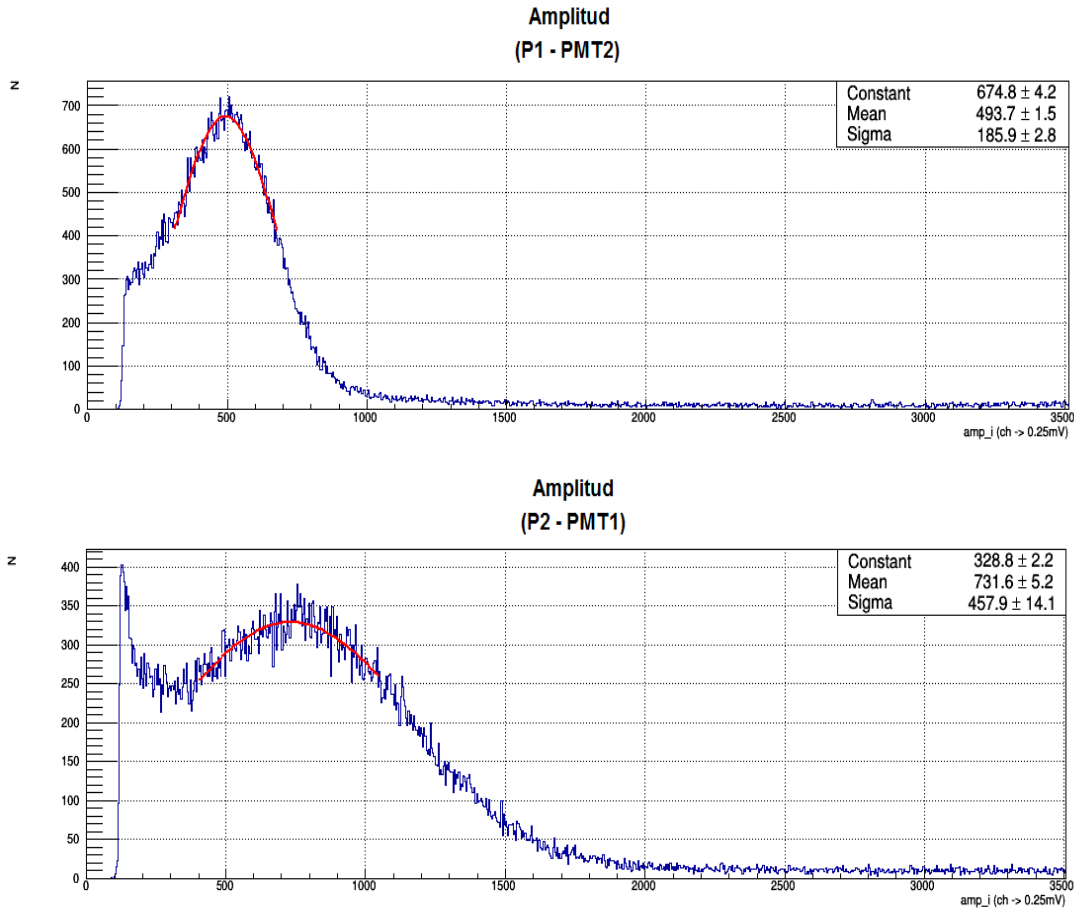


Figura 3.4. Acoplamiento inverso, P1-PMT2 en el histograma de arriba y P2-PMT1 en el histograma de abajo, ambas distribuciones con su ajuste.

De las figuras anteriores observamos que existe una mínima diferencia en la colección de luz; observando los eventos para el prototipo P1 con el PMT1 y después el PMT2 obtenemos una razón del 0.08 de diferencia y realizando lo mismo para el prototipo P2 calculamos una razón del 0.03 como diferencia. Esto quiere decir que tuvimos un correcto funcionamiento de los fotomultiplicadores.

3.1.2. Reflectores

Como se mencionó anteriormente para recolectar la mayor cantidad de luz posible por el detector es necesario utilizar algún tipo de reflector que envuelva al centellador y ayude a aumentar la colección de luz. En este caso realizamos pruebas con cuatro diferentes

reflectores, papel negro, espejo, tyvek y pintura blanca, pero sólo para el prototipo 1 debido a que el prototipo dos está hecho de fibras centelladoras y estas no son de nuestro interés para la construcción del prototipo final, de aquí en adelante este prototipo sólo servirá para confirmar los eventos, es decir para realizar el trigger. De aquí que el PMT1 vaya acoplado a este prototipo P1 y el PMT2 al prototipo P2. En la Figura 3.5, 3.6 y 3.7 se muestran las amplitudes para los primeros tres reflectores (papel negro, espejo y tyvek) utilizando el mismo voltaje de operación del PMT1 para todos los reflectores, en este caso fue 2400 V. La comparación con la pintura blanca se discutirá más adelante porque una vez pintado el centellador ya no se podrían realizar más pruebas con otros reflectores.

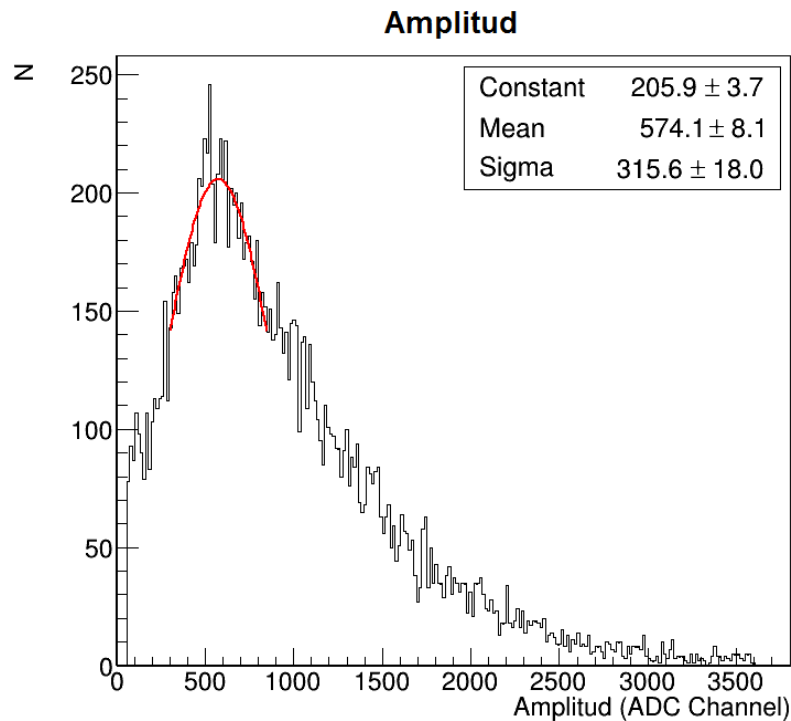


Figura 3.5. Distribución de amplitudes para papel negro como reflector y a 2400V de operación para el PMT1.

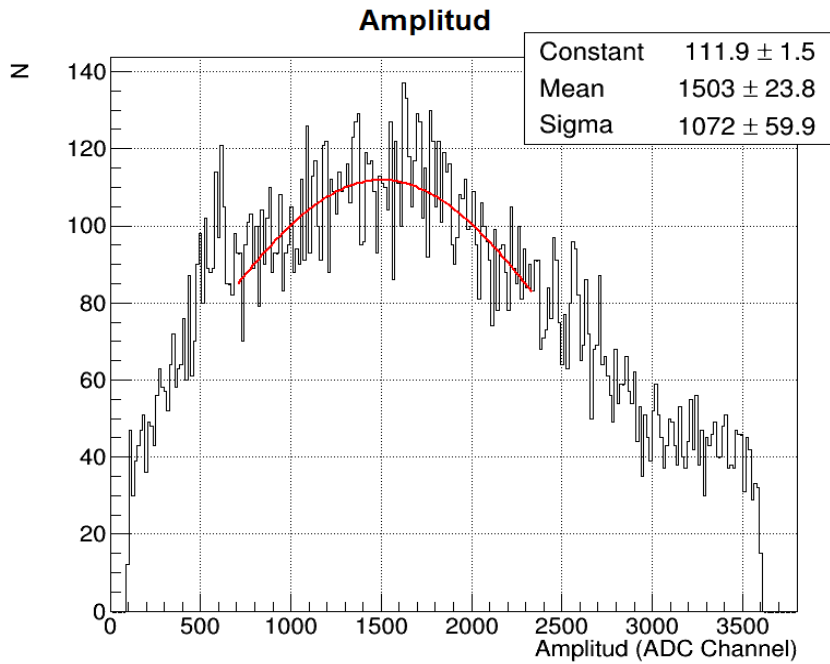


Figura 3.6. Amplitud para el prototipo P1 con espejo como reflector y su ajuste.

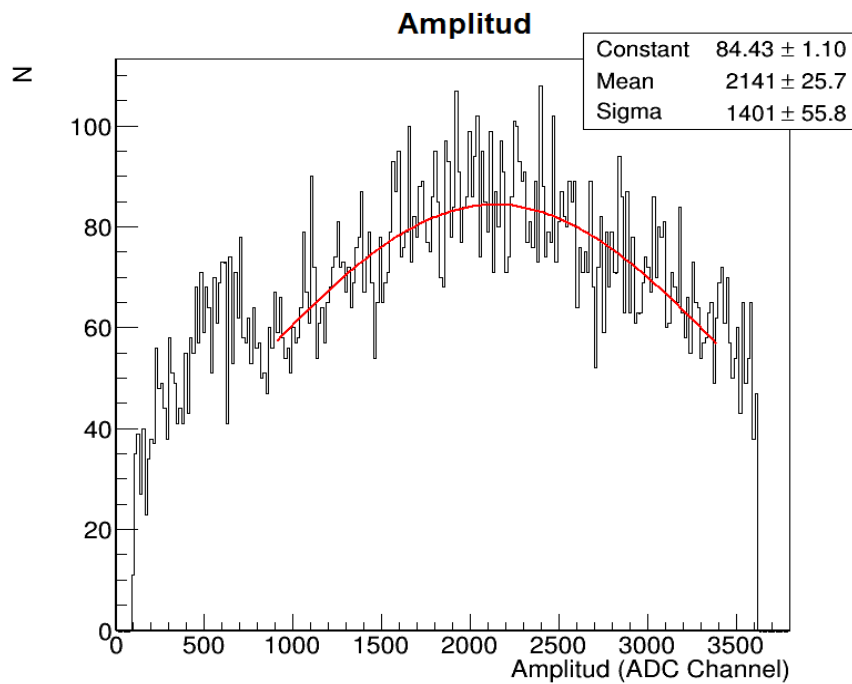


Figura 3.7. Amplitud obtenida en el prototipo P1 usando tyvek como reflector.

Puede observarse en el espejo y en el tyvek dos picos, el pico de la izquierda es la intensidad de luz generada por las partículas, mientras que el pico derecho es el resultado de la reflexión de esta luz debida a tales reflectores. La mayor ganancia en la colección de luz se obtiene con el tyvek, seguida por el espejo y papel negro. Si tomamos el papel negro como referencia obtenemos la Tabla 4 donde se indica cómo aumenta la ganancia al cambiar el reflector.

Reflector	Ganancia	
Papel Negro	575 ± 8.1	Base
Espejo	1503 ± 23.8	2.6 más luz que en papel negro
Tyvek	2141 ± 25.7	3.7 más luz que es papel negro

Tabla 4: Colección de luz para los diferentes reflectores.

En la prueba con pintura blanca como reflector, agregamos un centellador debajo del prototipo 2 de la Figura 3.1, el objetivo de haber colocado este centellador es disminuir el ruido por eventos accidentales. Entonces el trigger se daba cuando la partícula pase a través de ambos prototipos y por el centellador, registrando la señal.

Con la reducción del ruido en nuestras señales analizamos el comportamiento del fotomultiplicador PMT1 utilizando pintura blanca como reflejante. El resultado es el que se observa en la Figura 3.8. Donde los voltajes fueron 1900, 2000, 2100, 2200 y 2300, para cada una de las distribuciones se les ajustó una función gaussiana.

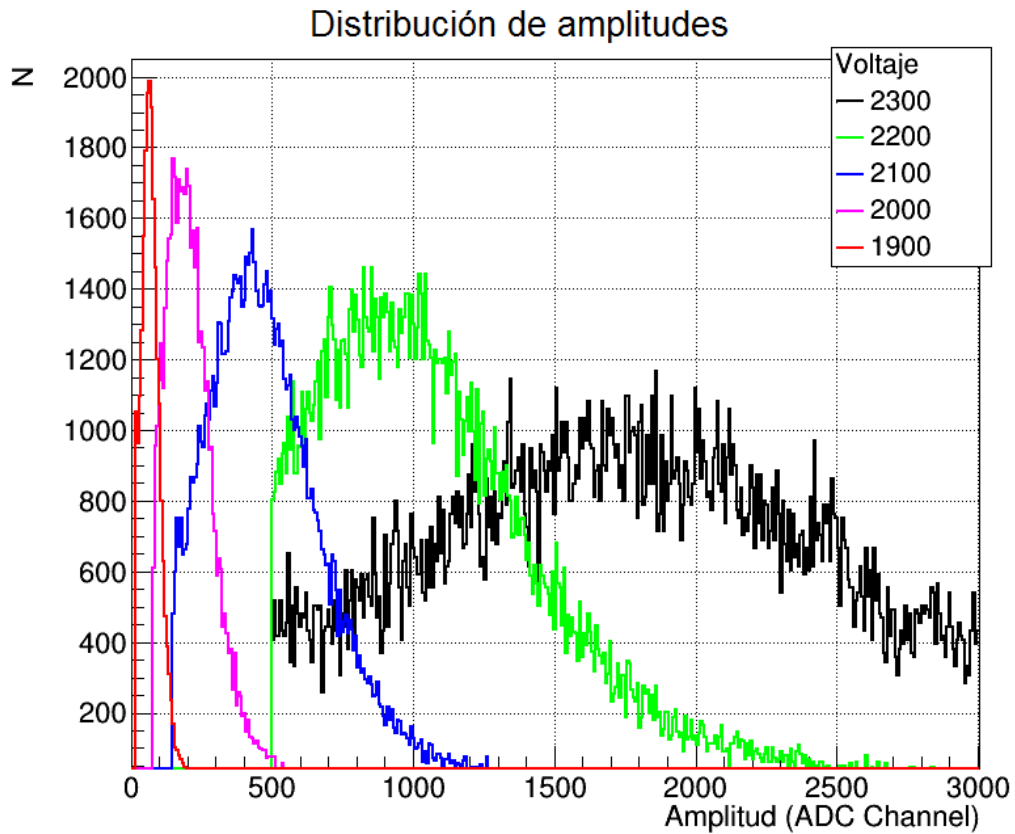


Figura 3.8. Amplitudes para diferentes voltajes de operación utilizando pintura blanca como reflejante en el prototipo 1, se puede observar como conforme se aumentó el voltaje en el PMT1, aumento la cantidad de luz colectada por el fotomultiplicador.

Podemos ver como efectivamente al aumentar el voltaje del PMT encontramos una mayor colección de luz, pero el comportamiento no es lineal (Fig. 3.9), sino la curva que se ajusta a cada punto es un polinomio de grado 3. Con el prototipo 2 tampoco hay un comportamiento lineal (imagen 3.10).

Amplitud vs Voltaje

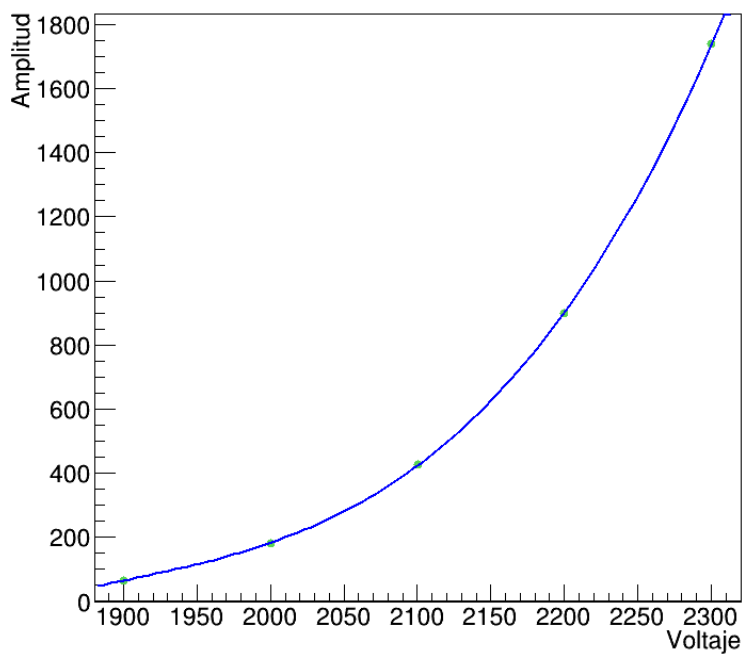


Figura 3.9. Comportamiento del PMT1 acoplado a P1.

Amplitud vs Voltaje

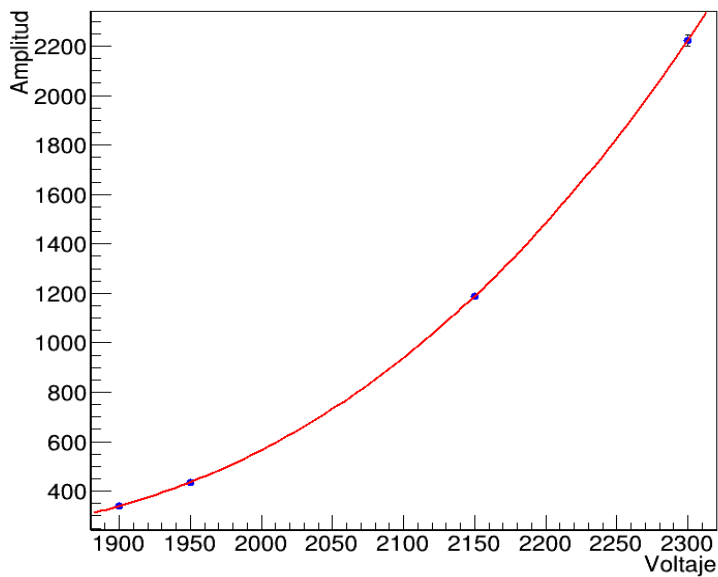


Figura 3.10. Comportamiento del PMT2 acoplado a P2.

Ya que tomamos datos con pintura blanca nos fijamos en la amplitud obtenida para pintura y espejo a 2300V. La ganancia que obtuvimos en espejo fue 795 mientras que en pintura determinamos 1740. Por otro lado para el espejo tiene 2.6 más luz que el papel negro a 2400V, entonces para pintura encontramos un 5.6 más luz que en papel negro; es decir un 0.5 más colección de luz en pintura blanca que en tyvek.

3.1.3. Resolución temporal

La resolución temporal es el mínimo intervalo de tiempo que puede ser medido con precisión. La resolución puede ser medida de diferentes maneras, una de ellas es medir la diferencia de tiempo entre dos señales que coinciden. Para obtener la resolución temporal realizamos una diferencia de tiempos entre prototipos, a partir de esto obtenemos una distribución a la cual le ajustamos una gaussiana y la anchura de esta (el valor σ del ajuste) nos dará el valor de la resolución temporal.

La resolución temporal para voltajes 2300, 2200, 2100, 2000, 1900 puede verse en la Figura 3.11, donde al tener un aumento en el voltaje del PMT tenemos una disminución en la resolución. En la Tabla 5 se muestran los valores de la resolución para cada voltaje.

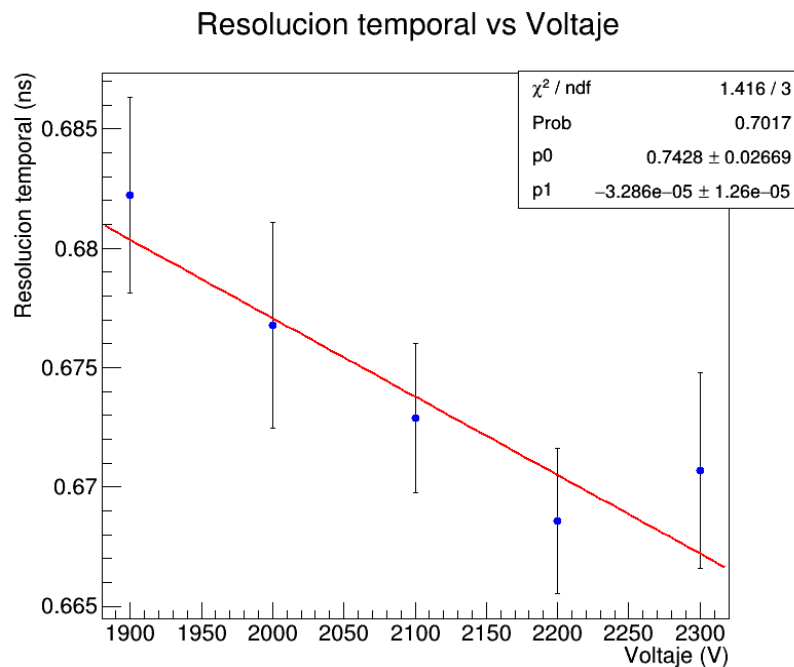


Figura 3.11. Comportamiento de la resolución temporal al aumentar el voltaje del PMT.

Votaje (V)	Resolución temporal (ns)
1900	0.682 ± 0.004
2000	0.676 ± 0.004
2100	0.672 ± 0.003
2200	0.668 ± 0.003
2300	0.670 ± 0.004

Tabla 5: Valores de la resolución temporal para cada voltaje del PMT.

La resolución temporal obtenida fue de $\approx 0.67\text{ns} = 670\text{ps}$. Podemos observar que para 2300V la resolución temporal aumenta, adjudicamos este cambio del comportamiento al voltaje utilizado ya que el voltaje óptimo de operación del PMT es de 2000V (ver Tabla 3) y 2300 está muy próximo al máximo valor de operación.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Con estas pruebas se determinaron varios aspectos para mejorar los siguientes prototipos al ser expuestas bajo un microscopio;

Construcción. Un detalle importante es la limpieza de cada pieza que va ser parte del prototipo, después de haber revisado con más detalle los prototipos, bajo microscopio, pudimos observar que las fibras no estaban totalmente limpias, aún quedaban residuos del polvo que se genera cuando son pulidas, que no son visibles ante nuestros ojos, Fig. 4.1. Este polvo disminuye la colección de luz, tapando la visión del PMT. Posteriormente para los nuevos prototipos se espera que con los nuevos materiales obviamente se elimine este problema.

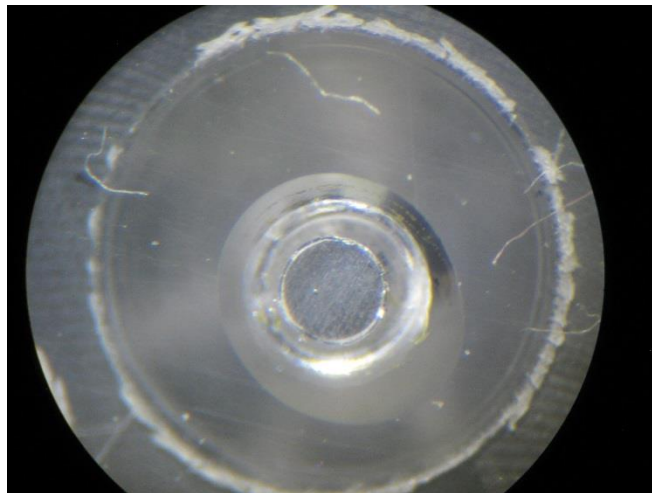


Figura 4.1. Una de las fibras del prototipo 1, donde se aprecia que la superficie de esta no está limpia adquiriendo un color blanquecino.

También notamos que al ser pulidas las fibras, el recubrimiento o cladding se dañaba, no en su totalidad, pero sí en zonas donde la fibra no hace contacto con alguna superficie evitando que se desprenda del núcleo de la fibra, ver Fig. 4.2, además las fibras mostraron ralladuras en su superficie. En el caso del prototipo 2 en el cual se perforó el centellador, quedaron residuos de material en los orificios pero, al ser muy pequeños no pueden ser pulidos o limpiados (Fig. 4.3).

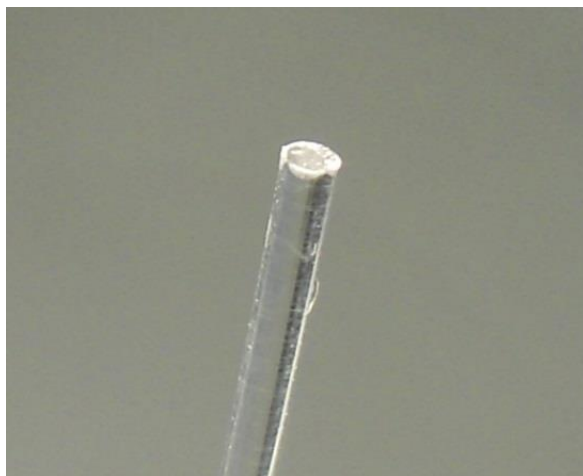


Figura 4.2. Cladding dañado por el pulido de las fibras, se observa como la superficie también contiene ralladuras.

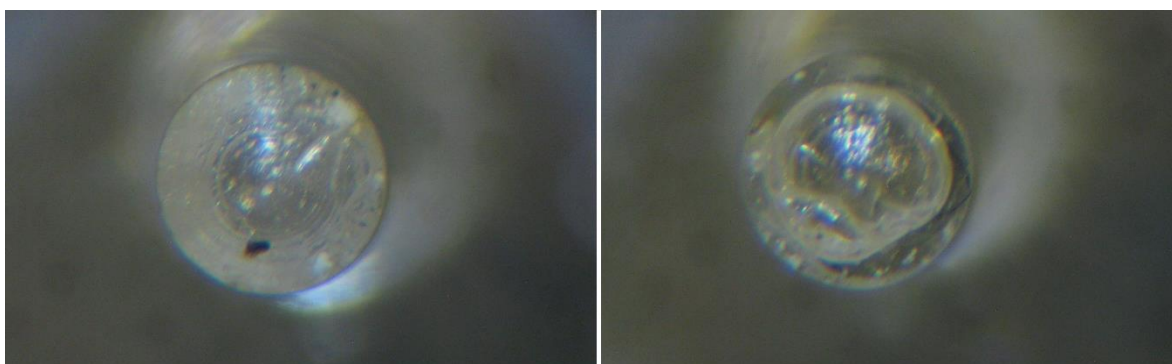


Figura 4.3. Fibras insertadas en orificios del centellador para prototipo 2. Puede verse como el centellador quedo dañado al ser perforado, además de algunos residuos.

El contenido de burbujas entre el centellador y las fibras fue otro factor que estaba presente en un 75% de las fibras del prototipo 1. A pesar de que las fibras fueron revisadas antes de realizar los prototipos, eligiendo sólo las que se encontraban en buen estado, algunas mostraron bajo microscopio que no transmitían toda la luz capturada, si no que parte de la luz era reflejada de nuevo al centellador; indicando que las fibras no estaban en condiciones óptimas. Esto se muestra en la Fig. 4.4 donde la coloración amarilla indica que la luz que captura la fibra no es completamente transmitida reflejándose. Mientras que una fibra que transmite toda la luz se ve completamente oscura, de las cuales solo encontramos un 3.5% de las fibras.

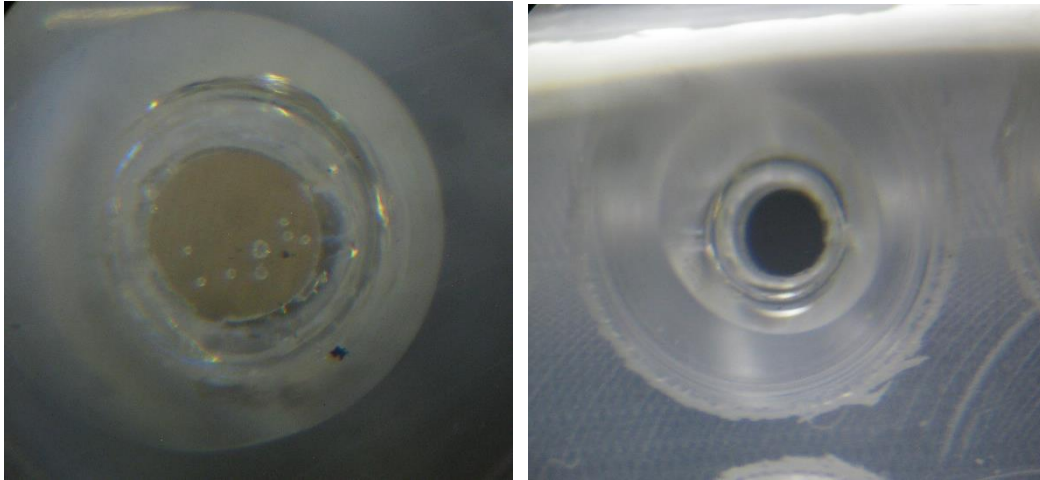


Figura 4.4. Diferencia entre una fibra que no transmite por completo la luz (izquierda) y una que sí la transmite (derecha).

Para la parte del boundle es necesario mejorar el diseño y tamaño para que las fibras queden completamente ordenadas y sea posible identificar cada una, además mejorará el aspecto de los prototipos lo cual también es un detalle importante.

Algunos detalles han sido mejorados en el nuevo prototipo (Fig. 4.5). Las fibras van insertadas y adheridas dentro de un plástico que posteriormente es pulido hasta lograr que todas las fibras estén alineadas con la superficie de este, posteriormente el plástico y el centellador son acoplados evitando así burbujas, residuos y ralladuras (Fig. 4.6 (a)) Además el plástico es cubierto por una capa de pintura blanca. En la parte del boundle se construyó una base donde se insertan las fibras de una forma ordenada (Fig. 4.6 (b)).

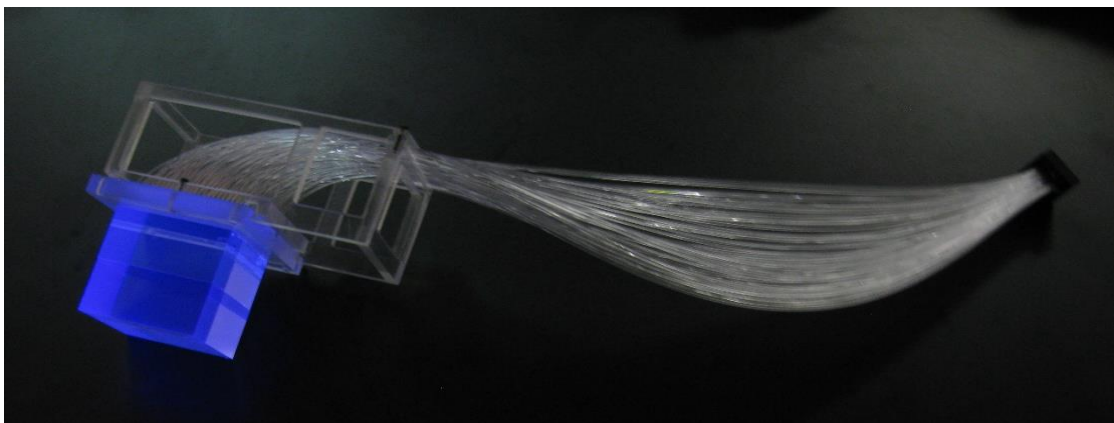
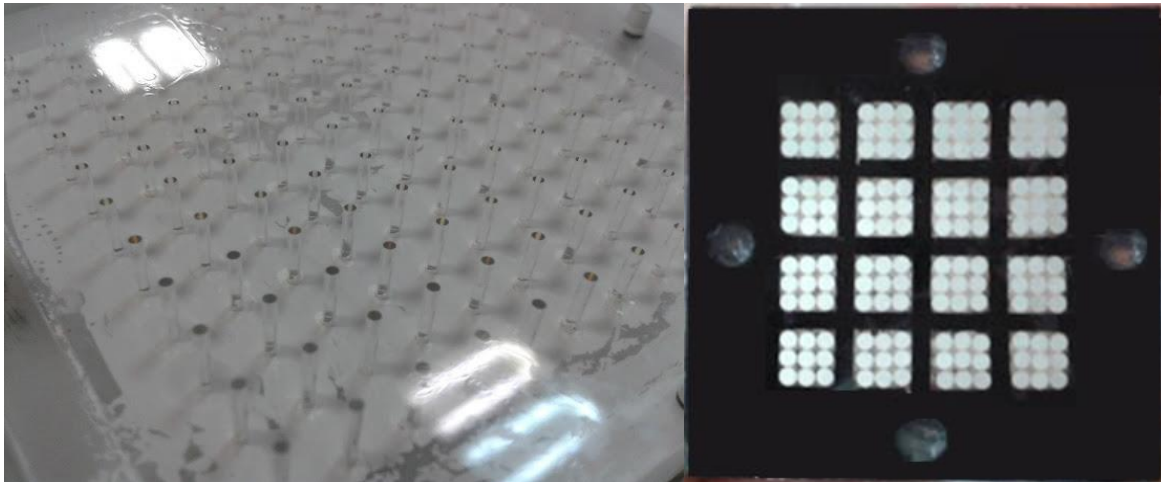


Figura 4.5. Nuevo prototipo de V0-plus.



(a)

(b)

Figura 4.6. (a) Superficie del plástico que contiene las fibras para ser acopladas al centellador, (b) Bundle del nuevo prototipo.

Toma de datos. Definitivamente es necesario tomar más datos con las mismas condiciones y características en ambos prototipos, en esta ocasión tuvimos archivos los cuales no habían sido tomados en las mismas condiciones y por tanto no se pudieron comparar en todos los aspectos.

Análisis. El material que mejor funcionó como reflector fue la pintura blanca, obteniendo hasta un 0.5 más colección de luz que con tyvek, el cual parecía ser el mejor de los primeros tres materiales que se utilizaron. Estos resultados se corroboraron con el nuevo prototipo, donde también se obtiene 3.7 más luz utilizando tyvek como reflector que papel negro y 0.4 más luz en pintura que en tyvek Fig. 4.7.

Esto deja claro que para pruebas posteriores el centellador estará pintado, ya que la pintura recubre mejor al centellador al no permitir que entre aire entre el reflector y éste; de esta forma también se evitan pérdidas de luz.

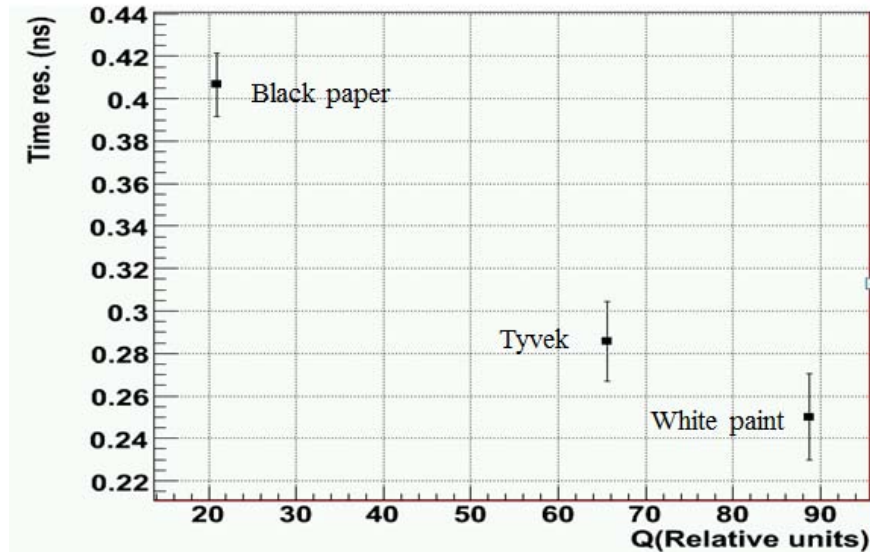


Figura 4.7. Resolución temporal y amplitud para datos tomados con el nuevo prototipo.

Reducir el voltaje de operación para los fotomultiplicadores es importante, ya que con voltajes muy altos el fotomultiplicador tiende a saturarse más y comienzan a mostrarse anomalías en los datos, ver tabla 3. Por otro lado obviamente al usar voltajes más altos la señal de ruido también aumenta.

Resolución temporal. En la resolución temporal tenemos un comportamiento descendente conforme se aumenta el voltaje de operación del PMT como es de esperarse, pero la resolución para el voltaje de 2300 ya no continúa con el mismo comportamiento, esto quiere decir que el PMT comienza a saturarse y aumenta la resolución temporal. Por tal motivo se tendría que trabajar con voltajes menores a este. La resolución temporal, más baja fue de 0.668 ± 0.003 ns, cuando la meta es de $200 \text{ ps} = 0.2 \text{ ns}$. Para mejorar esta resolución es necesario aumentar el grosor del centellador, esto nos dará una mayor cantidad de fotones.

El trabajo realizado con estos dos primeros prototipos nos ayudó a determinar en qué puntos debemos enfocarnos más y cuales mejorar. El hecho de no haber utilizado materiales nuevos es importante porque no contamos con el equipo necesario para dar un buen acabado a los materiales y como la respuesta del centellador es muy pequeña se ve muy afectada por el tipo de imperfecciones que se tuvieron.

Referencias

- [1]. CERN. *Cern website*. (2015). [En línea]. <http://home.web.cern.ch/>.
- [2]. Serradilla, E. (2013). *Producción de Núcleos de Deuterio y Antideuterio en el Experimento ALICE del LHC*. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas.
- [3]. CERN. *ALICE*. 2015.[En línea]. <http://home.cern/about/experiments/alice>.
- [4]. CERN. *ALICE Collaboration*. (2008). [En línea]. <http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Page3-subdetectors-en.html>.
- [5]. León, H. (2008). *El Detector V0A del Experimento ALICE-CERN*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, IFUNAM.
- [6]. González, L. (2013). *Obtención del Plano del Evento por Evento Utilizando el Detector V0 para el Experimento ALICE del LHC*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, IFUNAM.
- [7]. CERN. (2004). *ALICE Technical Design Report on Forward Detectors FMD, T0 and V0*. <https://cds.cern.ch/record/781854/files/lhcc-2004-025.pdf>.
- [8]. ALICE Collaboration. (2013). *Performance of the ALICE VZERO system*. <http://arxiv.org/pdf/1306.3130.pdf>.
- [9]. Birks, J.B. (1951). *Scintillations from Organic Crystals: Specific Fluorescence and Relative Response to Different Radiations*. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0370-1298/64/10/303/meta>.
- [10]. Birks, J.B. (1964). *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. London: Pergamon.
- [11]. Knoll, F. (1999). 3a ed. *Radiation Detection and Measurement. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.*
- [12]. Leo, W. (1987). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Germany : Springer Verlag.
- [13]. Cherry, S., Sorenson, J. y Phelps, M. (2012). *Physics in Nuclear Medicine*. Philadelphia : ELSEVIER SAUNDERS.
- [14]. ALICE Collaboration. (2008). *The ALICE experiment at the CERN LHC*. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08002/pdf>

- [15]. CERN. (2013). *ALICE: Physics performance report, volumen VIII*. Suiza : CERN.
- [16]. CERN. *ALICE*. (2014). [En línea]. <http://alipub.web.cern.ch/>.
- [17]. CERN. *Document Server*. (2014). [En línea]. <https://cds.cern.ch/youraccount/display?ln=es>.
- [18]. CERN. *ALICE Matters*. (2011). [En línea]. <http://alicematters.web.cern.ch/?q=alice-mexican-group>.
- [19]. González, L. (2008). *Construcción y Calibración del Detector VOA con Rayos Cósmicos para el Experimento ALICE*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [20]. Becerril, A. (2004). *Construcción y pruebas del prototipo VOL para el experimento ALICE del CERN*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [21]. *Radioisotopes and Radiation Methodology*. [En línea] <https://www.science.mcmaster.ca/medphys/images/files/courses/4R06/note4.pdf>.
- [22]. Naeem, S. (2007). *Physics & Engineering of Radiation Detection*. Great Britain: ELSEVIER.
- [23]. http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_I/muon/bicron_bc400-416.pdf
- [24]. Ferrer, A. (2006). *Física Nuclear y de Partículas*. España: PUV.
- [25]. http://www-physics.lbl.gov/~spieler/physics_198_notes/PDF/IV-E-Deposition.pdf.
- [26]. http://www.phys.ufl.edu/courses/phy4803L/group_I/muon/bicron_bc400-416.pdf.
- [27]. <https://my.et-enterprises.com/pdf/XP2020.pdf>
- [28]. Rodríguez, M. (2012). *Detección de Muones Atmosféricos en el experimento ALICE-LHC*. Tesis de Doctorado. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [29]. Camacho, E. (2007). *Calibración del detector VOA y polarización longitudinal de $\overline{\Lambda}_0$ en ALICE*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.

- [30]. Kuraray. *Scintillation Materials*. [En línea].
http://www.phenix.bnl.gov/WWW/publish/donlynch/RXNP/Safety%20Review%206_22_06/Kuraray-PSF-Y11.pdf.
- [31]. Saint – Gobain Crystals. *Organic Scintillation Materials*. [En línea].
<http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/SGC%20Organics%20Brochure.pdf>.
- [32]. Garzón, J. *Instrumentación Nuclear*. [Diapositivas de Power Point].
http://www.usc.es/labcaf/es/system/files/INuclear_IRM_0.pdf.