

# Optimización de Fibras Ópticas WLS para Aplicaciones en Telescopios de Muones

---

A. Ruiz,<sup>1</sup> D. Londoño<sup>2</sup>

*Departamento de Física,  
Universidad de los Andes,  
Bogotá, Colombia*

**RESUMEN:** El propósito del presente proyecto radica en la evaluación del desempeño eficiente de las fibras ópticas de emisión de luz en el espectro visible («Wave-Length Shifter», WLS), con miras a su ulterior incorporación en un proyecto auspiciado por el grupo de altas energías de la Universidad de los Andes. Dicho proyecto tiene como objetivo la construcción de un telescopio de muones. El procedimiento de verificación se dividió en dos fases fundamentales: en primer lugar, se procedió a confirmar el funcionamiento óptimo de los fotomultiplicadores mediante el empleo de un diodo emisor de luz (LED) de dimensiones reducidas y un generador de señales, el cual generó pulsos de alta frecuencia y baja intensidad en el LED. Estos pulsos fueron posteriormente detectados por un osciloscopio, corroborando así la eficacia operativa de los fotomultiplicadores. En una segunda etapa, se implementó un nuevo montaje experimental que incorporó placas de centelleo conectadas a las fibras ópticas WLS. Estas últimas, a su vez, fueron enlazadas a un fotomultiplicador. La señal detectada y emitida por el fotomultiplicador fue sometida a un análisis detallado en un "crate" equipado con diversos puertos, entre ellos discriminadores, unidades lógicas, dual channel bcd scaler, entre otros. A través de estos componentes, se determinó el voltaje de umbral adecuado para maximizar la eficiencia del sistema. Utilizando dicho voltaje, se evaluó la eficiencia individual de cada fibra, así como situaciones particulares que serán objeto de una explicación detallada en el presente documento al igual que un registro de datos mediante histogramas TDC y QDC para cada fibra. Este análisis permitió verificar que las fibras ópticas WLS son apropiadas y adecuadas para su implementación en el proyecto del telescopio de muones.

**PALABRAS CLAVE:** Fibras ópticas WLS, Telescopio de muones, Eficiencia del sistema, Bloque centellador

---

<sup>1</sup>a.ruiz2@uniandes.edu.co

<sup>2</sup>d.lodono@uniandes.edu.co

---

## Tabla de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Montaje Experimental</b>	<b>6</b>
2.1. Validación del Funcionamiento del Fotomultiplicador mediante Evaluación con LED y Generador de Señales	6
2.2. Validación del Funcionamiento de la Placa centelladora en Conjunto con Fibra Óptica	8
2.3. Conexiones TDC y QDC para una fibra	10
2.4. Validación del Funcionamiento de la Placa centelladora en Conjunto con Cuatro Fibras Ópticas	11
<b>3. Resultados y Análisis</b>	<b>16</b>
3.1. Funcionamiento PMT	16
3.2. Mejor Voltaje Threshold	17
3.3. Histogramas TDC y QDC para una fibra	18
3.4. Eficiencia de Casos Considerados	20
3.5. Histogramas TDC y QDC para las cuatro fibras	21
<b>4. Conclusiones</b>	<b>22</b>
<b>Referencias</b>	<b>23</b>
<b>Apendice de Cálculo de Errores</b>	<b>24</b>

---

# 1. Introducción

Los muones, partículas elementales generadas a través del decaimiento de piones ( $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ ) y kaones ( $K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ ) [1], comparten similitudes con el electrón en términos de carga y espín. Sin embargo, su masa es notablemente mayor, siendo 207 veces la masa del electrón. Además, los muones tienen un tiempo de vida medio de aproximadamente  $2,2\mu\text{s}$ . Gracias a estas propiedades únicas y a su gran capacidad de penetración, los muones se convierten en partículas ideales para la tomografía de estructuras. En este contexto, la muografía juega un papel crucial en la imagenología geofísica, arqueología y en la física de partículas.

La muografía se posiciona como uno de los métodos no destructivos más ampliamente empleados en la imagenología geofísica. En 1955, E. P. George revolucionó la técnica al utilizar un contador Geiger para medir la atenuación del flujo de muones, con el propósito de determinar la densidad de un bloque de hielo dentro de un túnel y, por ende, su peso [2, 3].

Más allá de este evento, el primer uso de la muografía en arqueología se enfocó en la detección de cámaras ocultas dentro de la pirámide de Kefrén. A pesar de que las dos pirámides previamente construidas poseen varias cámaras ocultas, el experimento de Alvarez (et al.) demostró que no se encontró ninguna cámara secreta en la pirámide [4].

Aunque existen actualmente otras formas de llevar a cabo este tipo de experimentos, la muografía sigue siendo uno de los métodos más importantes e influyentes. Recientemente, se realizó un experimento para descubrir salas secretas dentro de la Gran Pirámide de Giza, utilizando la muografía para revelar una cámara de aproximadamente 30 metros de longitud y una sección transversal similar a la Gran Galería, otro pasaje encontrado en esta pirámide. Sin embargo, el propósito de dicha cámara aún no se ha determinado [5]. (Para obtener más información sobre estas contribuciones, se puede visitar el sitio web de «ScanPyramid» [6]).

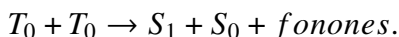
Con esta premisa, la muografía ha ampliado sus aplicaciones en diversos campos de la geofísica y la arqueología, desempeñando un papel crucial en la vulcanología. Estas técnicas posibilitan la obtención de imágenes del interior de los volcanes, brindando perspectivas detalladas sobre su historial eruptivo, formación, desestabilización de flancos y movimientos internos de fluidos. Al combinar estos datos con otra información relevante, los científicos pueden evaluar de manera efectiva y cuantificar el riesgo de erupción asociado a un volcán.

Un método ampliamente reconocido para observar y medir el flujo de muones es el uso de centelladores. Estos materiales poseen la capacidad de emitir un breve resplandor de luz, conocido como centelleo. Este proceso tiene lugar cuando la radiación interactúa con la materia, estimulando e ionizando numerosos átomos y moléculas. Al regresar a su estado fundamental, estos elementos se des-excitan emitiendo fotones con niveles de energía dentro del espectro visible o en sus cercanías. Estos materiales son pioneros en la detección de partículas desde el experimento de dispersión alfa de Rutherford en 1910. En la actualidad, se

clasifican en tipos como orgánicos, inorgánicos y gaseosos [7]. Entre ellos, los centelladores orgánicos, especialmente los plásticos, son ampliamente utilizados debido a su versatilidad y coste económico.

Los componentes fundamentales de los centelladores orgánicos son hidrocarburos aromáticos, caracterizados por su abundancia de carbono e hidrógeno. Estos materiales centelladores constan de dos capas distintas. La primera capa, al recibir radiación, emite fotones con una longitud de onda comprendida entre 300nm ~ 370nm. Por otro lado, la segunda capa realiza la función de absorbente de fotones y los emite a una longitud de onda más extensa, generalmente en el rango de 400nm ~ 450nm, ubicándose aproximadamente en el espectro ultravioleta. Este fenómeno es conocido como «wavelength shifter» [8].

Los compuestos aromáticos exhiben orbitales moleculares  $\pi$ , en los cuales los electrones no están vinculados a un átomo específico. La luz de centelleo se genera a través de transiciones entre niveles energéticos de los electrones de valencia. La energía transferida por radiación mediante ionización y excitación provoca que los electrones de valencia ocupen tanto los estados electrónicos excitados como los subniveles vibracionales. En el caso del estado singlete, los modos vibracionales decaen inmediatamente al estado  $S_1$  (estado excitado de espín  $S_1$ ) sin emitir radiación, conocido como degradación interna. Desde  $S_1$ , los electrones decaen tanto al estado fundamental ( $S_0$ ) como a sus subniveles vibracionales, emitiendo radiación, denominada centelleo. En el estado triplete, también ocurre el proceso de degradación interna, llevando los electrones de los modos vibracionales al estado  $T_1$ . A partir de esto, los electrones en el estado  $T_0$  decaen al interactuar con los electrones de otras moléculas también excitadas al estado  $T_0$ . Esto se expresa como:



Este proceso permite que la molécula permanezca en el estado  $S_1$ , lo que resulta en el fenómeno mencionado anteriormente para el estado singlete [8].

Debido a la naturaleza molecular de la luminiscencia de estos materiales, los centelladores orgánicos pueden adoptar diversas formas sin perder sus propiedades. Como resultado, se logra una transferencia eficiente de luz incluso a distancias considerablemente grandes [9], convirtiéndolos en una excelente opción para la detección de muones.

Por lo tanto, la cantidad de luz generada en el centellador es relativamente baja, lo que requiere amplificación antes de ser registrada como un pulso o señal. Para este propósito, se emplea un tubo fotomultiplicador [7]. Además, es esencial transformar la luz producida por el centellador en una señal registrable. En este contexto, el uso del fotomultiplicador adquiere gran importancia, ya que este tipo de fotodetectores posee una ganancia interna excepcionalmente alta, permitiendo la detección de señales incluso cuando son estimulados por unos pocos fotones [10].

De esta manera, Los fotomultiplicadores desempeñan un papel crucial en la detección de muones y, en términos generales, son instrumentos de vital importancia en la investigación de altas energías. Estos dispositivos constan de un fotocátodo fabricado con un semiconductor en el que los electrones de valencia están débilmente unidos. Los semiconductores tienen una región de energía denominada brecha prohibida, donde los electrones no pueden ocupar, y una característica llamada afinidad del electrón, que representa la energía entre la banda de conducción y el nivel de vacío. Además, tienen una función de trabajo, específica del material, que es la diferencia de energía entre el nivel de Fermi y el nivel de vacío.

Cuando los fotones impactan en el fotocátodo, los electrones en la banda de valencia absorben la energía del fotón, excitándose y desplazándose hacia la superficie del fotocátodo. Si estos electrones tienen suficiente energía para superar la barrera del nivel de vacío, se liberan como fotoelectrones en el vacío. La eficiencia cuántica ( $\eta(\nu)$ ) es la probabilidad de que este proceso ocurra, es decir, la proporción de electrones liberados respecto al número de fotones incidentes, y está dada por la fórmula:

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_\nu}{k} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{kL}} \right) \cdot P_s,$$

donde  $R$  es el coeficiente de reflexión,  $P_\nu$  es la probabilidad de que la luz absorbida excite electrones a un nivel mayor que el nivel de vacío,  $k$  es el coeficiente de absorción total de fotones,  $L$  es la distancia media de escape y  $P_s$  es la probabilidad de que los electrones que llegan a la superficie del fotocátodo sean emitidos al vacío[11].

Un ejemplo de un elemento que exhibe el efecto fotoeléctrico es el cesio, destacando por su función de trabajo de 2,1eV (consultar la referencia [12] para conocer los valores de la función de trabajo de diversos elementos).

Es relevante señalar que, según el efecto fotoeléctrico, los electrones de valencia se liberarán del material si se cumple la condición  $E_\gamma \geq \varphi$ , donde  $\varphi$  representa la función de trabajo del elemento en cuestión, en este caso, el cesio. En este contexto,  $E_\gamma$  es la energía del fotón incidente y se expresa como  $E_\gamma = hc/\lambda$ , con  $h$  como la constante de Planck,  $c$  como la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda$  como la longitud de onda del fotón (aproximadamente 500nm debido a la fibra óptica). Así, se deduce que  $E_\gamma \approx 2,48\text{eV}$ . Por lo tanto, el cesio se destaca como un material excepcional para su uso en fotomultiplicadores. El mismo cálculo se realiza para otros elementos. En el caso de este trabajo, el fotomultiplicador utiliza un fotocátodo de bialkali, compuesto de antimonio alcalino con una composición de  $K - Sb - Cs$  [13]. Como se discutió anteriormente, estos compuestos respetan el efecto fotoeléctrico.

A partir de este punto, es necesario dirigir los fotoelectrones mediante un sistema de focalización para que alcancen los dínodos y, de esta manera, se puedan multiplicar los electrones. Este proceso implica el uso de un campo eléctrico que depende del voltaje suministrado al fotomultiplicador, que en este trabajo se referirá como PMT (siglas en inglés). Gracias a la

diferencia de potencial generada por el PMT, los electrones experimentan una aceleración, y se busca que la mayoría de ellos se enfoquen hacia los dinodos [14].

La eficiencia de este sistema se puede calcular de la siguiente manera:

$$\varepsilon_d = \frac{\text{electrones que llegan al 1}^{er} \text{ dinodo}}{\text{fotoelectrones emitidos}} \sim \text{entre } 0,6 \text{ y } 0,9.$$

En consecuencia, los fotomultiplicadores, o PMT, demuestran ser altamente eficientes en este proceso [15].

Después de llegar al primer dínodo (electrodos de emisión secundaria), los electrones acelerados colisionan con las paredes del dínodo, compuesto por materiales con una función de trabajo relativamente baja [16]. Esta colisión resulta en la emisión de electrones secundarios, y la cantidad de emisión de cada dínodo se determina mediante la ecuación

$$\delta = \frac{\text{electrones emitidos}}{\text{electrones incidentes}} \sim 5.$$

Ahora bien, en un PMT, la cantidad de etapas se define como el número de dínodos presentes. En cada etapa, el dínodo tiene un potencial diferente, diseñado para aumentar la emisión de electrones durante la colisión en esa etapa específica. La cantidad total de electrones emitidos se calcula mediante la siguiente fórmula

$$\mu = \delta^n,$$

donde  $\mu$  es la cantidad de electrones,  $\delta$  es el coeficiente de emisión secundaria de cada dínodo, y  $n$  es la cantidad de etapas [11]. En este trabajo, se utiliza una estructura de dínodo lineal concentrada, conocida por su respuesta temporal rápida, buena resolución temporal y excelente linealidad de pulso. El PMT H6410 seleccionado para este estudio cuenta con 12 etapas, lo que implica que  $\mu \approx 3 \times 10^6$  [13]. Finalmente, los electrones totales son dirigidos hacia un ánodo que emite la señal de salida [15].

Como se mencionó previamente, una estrategia para convertir la luz generada por el centellador en una señal es a través de un fotodetector, como podría ser un fotomultiplicador. Sin embargo, la dimensión del centellador suele exceder considerablemente la del fotomultiplicador, lo que limita la eficiencia según el teorema de Liouville, indicando que el volumen se conserva en el espacio de fase. En consecuencia, el flujo de fotones por unidad de área y por unidad ángulo sólido debe permanecer constante. Esta limitación impide una conexión óptica eficiente basada únicamente en reflexión o difracción para transmitir fotones de una fuente más grande a una más pequeña [10].

Para superar este desafío, se emplea una fibra óptica que absorbe la luz del centellador y emite fotones de una longitud de onda mayor, redefiniendo así el espacio de fase. Las fibras de cambio de longitud de onda, también conocidas como fibras Wavelength Shifters (WLS),

cumplen precisamente esta función. Con un diámetro de aproximadamente 1mm, se acoplan con cemento óptico en la cara superior de las barras centelladoras. Estas fibras absorben fotones azules y emiten fotones verdes de alrededor de 500nm, con tiempos de decaimiento típicos entre 3 y 10ns. De esta manera, la luz puede ser transportada varios metros antes de ser captada por el fotodetector [10]. Uno de los ejemplos más claros del uso de todos estos componentes para el estudio de muones es visto en el trabajo de Wundheiler el cual busca medir la vida media de un muon [10].

Tomando en cuenta todos los elementos mencionados anteriormente, la Universidad de los Andes se embarca en el desarrollo de un detector de muones con el objetivo de generar una representación interna del cerro de Monserrate, ubicado a 1 km de la institución (puedes revisar la propuesta en [17]). Este informe se centra en abordar los aspectos teóricos y experimentales relacionados con la verificación del funcionamiento y la caracterización de la fibra óptica WLS, que será utilizada en la construcción del mencionado telescopio.

## **2. Montaje Experimental**

El análisis de las fibras ópticas se dividió en tres componentes esenciales, diferenciadas por su profundidad. La primera etapa se enfocó en verificar la eficiencia del fotomultiplicador (PMT) mediante el uso de un diminuto diodo emisor de luz (LED). Posteriormente, se procedió a confirmar el funcionamiento de una fibra WLS en la detección de muones al conectarse a una placa centelladora. Finalmente, se evaluó la funcionalidad colectiva de las cuatro fibras, asegurándose de que cada una contribuyera al incremento de la eficiencia del sistema al proporcionar una mayor cantidad de fibras para facilitar la detección. En esta sección, se presentan los montajes realizados para cada fase propuesta, acompañados de una breve explicación que aborda tanto el cómo como el porqué de su implementación.

### **2.1. Validación del Funcionamiento del Fotomultiplicador mediante Evaluación con LED y Generador de Señales**

Antes de verificar la funcionalidad de las fibras ópticas, es imperativo asegurar el óptimo rendimiento de los elementos utilizados para realizar las mediciones. Dado que las fibras están destinadas a conectarse, en un extremo, a un fotomultiplicador y, en el otro, a una placa centelladora, y considerando que la única manera de confirmar la eficiencia de esta última es mediante el uso de la fibra, es necesario verificar la integridad y la coincidencia en los rangos de emisión y absorción entre las fibras y el Fotomultiplicador (PMT). Para este propósito, se llevó a cabo una comprobación del fotomultiplicador mediante un experimento preliminar.



**Figura 1:** La imagen presenta las conexiones establecidas para verificar el funcionamiento del fotomultiplicador acoplado a la fibra óptica. En la representación visual, se destaca la precaución tomada para aislar la luz proveniente del LED mediante un circuito contenido dentro de paredes de cartón negro. La luz emitida por el LED es transmitida a través de la fibra óptica, visible en la mitad de la imagen. A su vez, la fibra transmite la luz con su nueva longitud de onda al estar acoplada al Fotomultiplicador (PMT), conforme se aprecia en la representación visual. Todo este montaje se encuentra contenido dentro de una caja de madera oscura con el propósito de prevenir efectos de ruido inducidos por la luz ambiental. Foto de autoría propia.

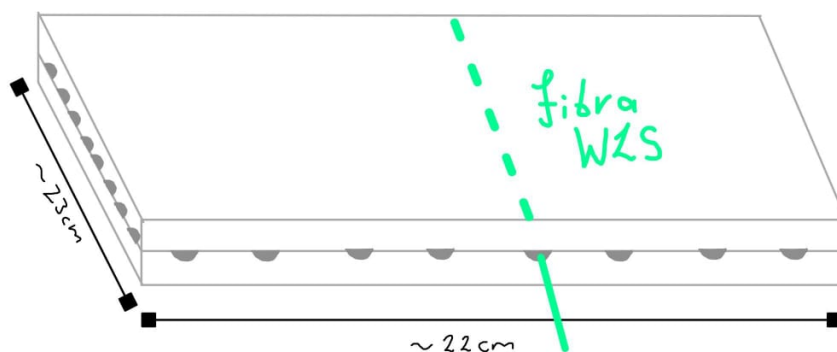
En este experimento, se emplearon una caja oscura, un pequeño LED, un generador de señales, un generador de voltaje, un PMT, un osciloscopio y la fibra WLS tal como se ilustra en la figura 1. La metodología consistió en conectar el generador de voltaje con polaridad negativa al fotomultiplicador, ajustando el voltaje a aproximadamente 2000V para que el fotomultiplicador pudiera detectar señales del LED. Este último estaba conectado a través de un circuito básico (compuesto por una resistencia y cables) al generador de señales, el cual activaba el circuito con un periodo de 800ns y un ancho de pulso de 20ns, generando pulsos breves y constantes apenas perceptibles al ojo humano. Estos pulsos de luz eran transmitidos a través de la fibra óptica hacia el fotomultiplicador, y la señal resultante era analizada mediante la conexión de un osciloscopio al canal de emisión de señal del fotomultiplicador. El propósito de este experimento era observar el pulso detectado y, de esta manera, confirmar el correcto funcionamiento del PMT para la detección de señales de esta naturaleza.



## 2.2. Validación del Funcionamiento de la Placa centelladora en Conjunto con Fibra Óptica

En esta fase, una vez confirmado el funcionamiento del fotomultiplicador, se procede a evaluar la capacidad de la fibra óptica para la detección de muones, dependiendo de la señal generada por la placa centelladora. Inicialmente, se verifica que el comportamiento con las señales generadas por la placa centelladora sea consistente con el evidenciado anteriormente con el pequeño LED. En esta etapa del montaje, no es necesario un generador de señales, ya que la propia placa centelladora, al detectar muones provenientes de la atmósfera terrestre, genera señales de luz que pueden ser detectadas por la fibra y transmitidas directamente al fotomultiplicador para realizar el mismo proceso.

Para esta sección, las conexiones se realizaron en una caja negra que contenía la placa centelladora engrasada con grasa óptica, cubierta con papel aluminio para maximizar la reflexión de la luz entre las paredes de la placa. Además, se recubrió con papel negro y cinta negra para prevenir la entrada de luz no deseada que podría generar ruido. A esta placa se le introdujo una fibra óptica WLS (véase la figura 2), conectada al fotomultiplicador para observar el pulso generado por muones.



**Figura 2:** La figura presenta una ilustración de un bloque centellador con una fibra WLS. Uno de los extremos de la fibra esta fibra se encuentra en contacto directo con la pantalla del PMT para lograr máxima eficiencia. Ilustración de autoría propia.

El siguiente paso implica comparar esta placa de prueba con dos paletas de centelleo que funcionan correctamente en la detección de muones. Se crea una pequeña matriz con tres placas (dos paletas y la placa con la fibra en prueba), como se muestra en la figura 3, utilizando un montaje similar pero sin la necesidad de una caja oscura debido al espacio que ocupa el nuevo diseño, para garantizar que no se filtre la luz se cubrió el montaje con bolsas de plástico

y cartulinas. Utilizando el discriminador, la unidad lógica y el dual channel bcd scaler del crate del laboratorio de altas energías, se mide la eficiencia de la fibra en comparación con las paletas.

En términos de conexiones, los tres detectores están conectados al fotomultiplicador, alimentado con una fuente de voltaje de polaridad negativa y voltajes en el rango de 2000V. Las señales de los PMTs se transportan a través de un cable al osciloscopio o a algún módulo del crate donde se realizan las conexiones pertinentes. Es crucial tener en cuenta que las salidas de los tres fotomultiplicadores se discriminan en el discriminador. Las dos paletas se discriminan a un voltaje de umbral (Threshold) de 500V, mientras que la discriminación de la fibra varía para obtener el mejor umbral de forma que se maximice su eficiencia y se minimice el ruido ambiental.

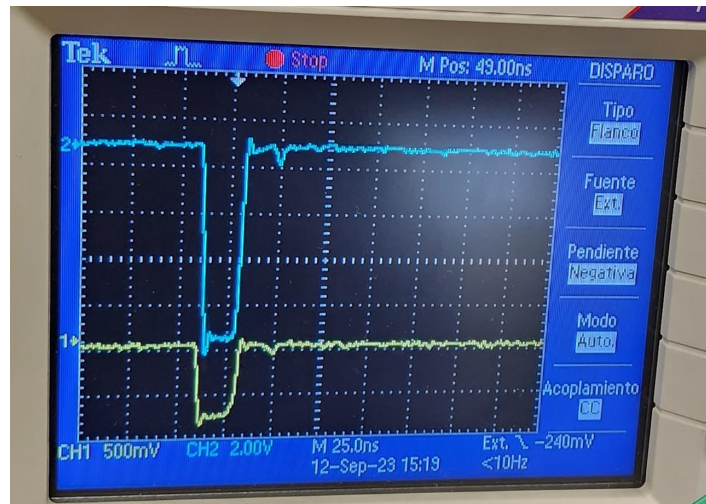


**Figura 3:** La figura presenta el montaje experimental realizado para una fibra. En ella, se visualiza la disposición de la matriz con las dos paletas centelladoras ubicadas en la parte superior e inferior del esquema. En el centro, se encuentra la placa centelladora conectada a la fibra óptica, y esta última está a su vez conectada al PMT (Tubo Fotomultiplicador)

Las señales discriminadas de las paletas arriba y abajo pasan a una unidad lógica que busca una doble coincidencia (AND), es decir, emite una señal solo cuando ambas paletas detectan un muón simultáneamente (véase todas las conexiones en el crate en la figura 8). Esta doble coincidencia, junto con la señal discriminada de la fibra, se dirige a un nuevo puerto de la unidad lógica donde se busca una triple coincidencia, es decir, emite una señal cuando tanto la doble coincidencia como la fibra emiten señales al mismo tiempo (con un pequeño retraso de unos pocos nanosegundos). Estas dos señales, la doble y la triple coincidencia, pasan a un nuevo módulo llamado dual channel bcd scaler, que cuenta cada vez que se emite una señal desde cada uno. De esta manera, se obtiene un cien por ciento en la doble coincidencia, y la

eficiencia se mide a partir de este cien para la triple coincidencia, permitiendo así observar el efecto de la placa con la fibra en comparación con las paletas.

La precisión en la verificación de los conteos para asegurar que representen valores cercanos a lo esperado requiere una atención meticulosa al delay introducido por los cables entre cada conexión al crate. Es fundamental que las entradas en la unidad lógica y el bcd scaler compartan el mismo retraso, garantizando así que al comparar un pulso con otro, se tomen simultáneamente o dentro de un rango de 10 nanosegundos, permitiendo su conteo. Para corroborar que estos delays estén dentro del mismo rango, además de tener cuidado con la calidad de los cables, es esencial conectarlos al osciloscopio. De esta manera, se puede observar que los pulsos coincidan o se superpongan, asegurándose de que estén dentro del rango de retraso máximo previamente mencionado. Un ejemplo de este procedimiento se ilustra en la siguiente figura (figura 4):



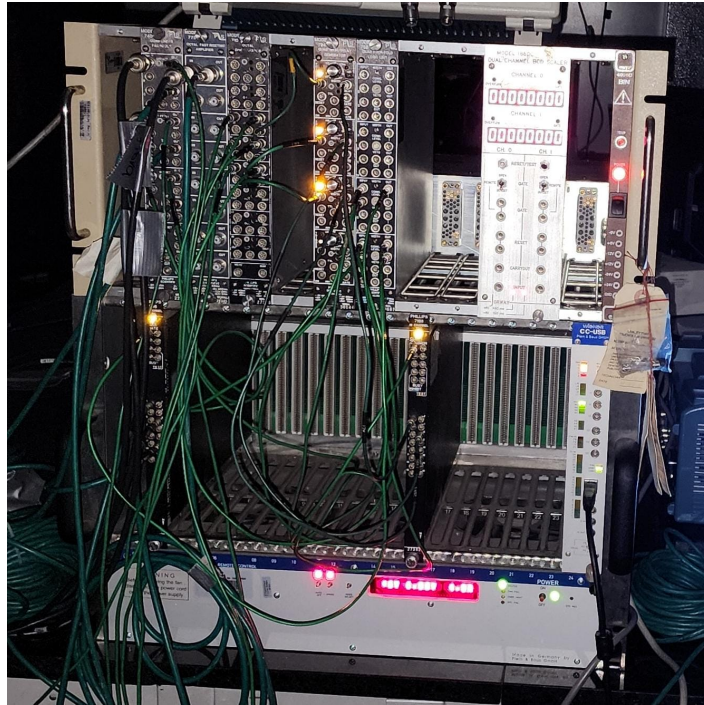
**Figura 4:** La figura exhibe los pulsos que ingresan al bcd scaler desde dos unidades lógicas, una para la doble coincidencia y otra para la triple coincidencia. Esta representación visual busca ilustrar cómo un pulso debe estar contenido dentro de otro para asegurar una eficacia óptima en los conteos. Este mismo principio se aplica a las unidades lógicas, cada una con sus respectivos módulos.

### 2.3. Conexiones TDC y QDC para una fibra

En el proceso de obtención de histogramas TDC («Time Digital Convertor») y QDC («Charge Digital Convertor»), se retoman las mismas conexiones utilizadas previamente para determinar la eficiencia de la fibra. La diferencia radica en que, además de estas conexiones, se incorporarán los módulos fan in fan out y quad delay (ver figura 8). En esta ocasión, el

objetivo es enviar señales crudas a los puertos del CAMAC, es decir, señales sin amplificación ni discriminación, a los canales del QDC y TDC.

En el caso del QDC, las señales de las fibras ingresan con un delay que debe ajustarse mediante cables (en este caso, se utilizaron 32 nanosegundos, aunque es crucial verificar la coincidencia de los pulsos con el osciloscopio). Este ajuste se realiza para igualar el delay de la doble coincidencia que entra al gate desde las conexiones ya establecidas en el montaje anterior. Para el TDC, la señal de la doble coincidencia también ingresa al gate, pero con la particularidad de que las señales de las fibras entran con un retraso de 100 nanosegundos. La disposición del montaje debería reflejar la siguiente configuración:

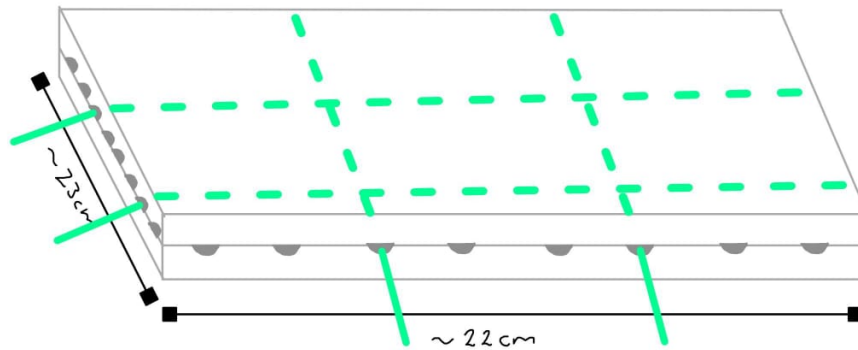


**Figura 5:** La imagen exhibe las conexiones requeridas en el módulo del CAMAC para generar los histogramas TDC y QDC.

## **2.4. Validación del Funcionamiento de la Placa centelladora en Conjunto con Cuatro Fibras Ópticas**

Para este montaje, es necesario volver a engrasar, si es necesario, la placa centelladora y recubrirla nuevamente con papel aluminio, cinta y papel negro. En esta ocasión, se conectarán cuatro fibras ópticas WLS a las ranuras del detector de centelleo con una disposición de dos fibras en sentido horizontal y dos fibras en sentido vertical, procurando que estén equidistantes,

como se ilustra en la Figura 8. Cada fibra se conectará respectivamente a un fotomultiplicador, de modo que se obtengan datos tanto en un eje X como en un eje Y. De esta manera, cada fibra detectará las señales de la placa, permitiendo cubrir una mayor área y, por ende, lograr una detección más amplia en el flujo de muones.



**Figura 6:** La figura presenta una ilustración de un bloque centellador que incorpora cuatro fibras WLS distribuidas en dos direcciones: vertical y horizontal. En detalle, se observan dos fibras para el eje vertical y otras dos para el eje horizontal. Ilustración de autoría propia.

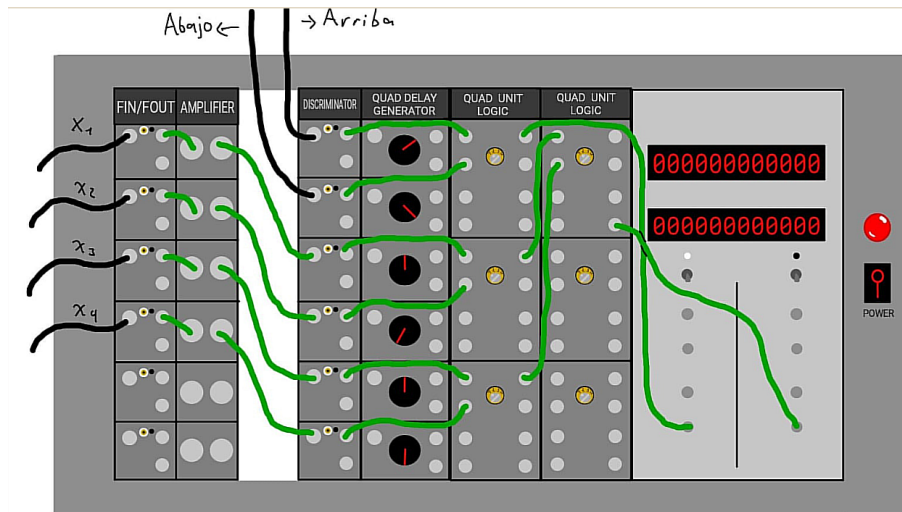
La disposición del montaje con la matriz de tres placas es nuevamente la misma, con dos paletas en la parte superior e inferior y una placa en el medio. La diferencia en esta ocasión es que se conectarán cuatro fibras ópticas WLS a la placa centelladora en el centro, cada una con su respectivo fotomultiplicador. Estos fotomultiplicadores serán alimentados con un voltaje de 2200V y polaridad negativa, ya que se ha determinado que este es su voltaje óptimo. Las señales de los fotomultiplicadores serán leídas por los módulos del crate y el osciloscopio, como se observa en la Figura 7.





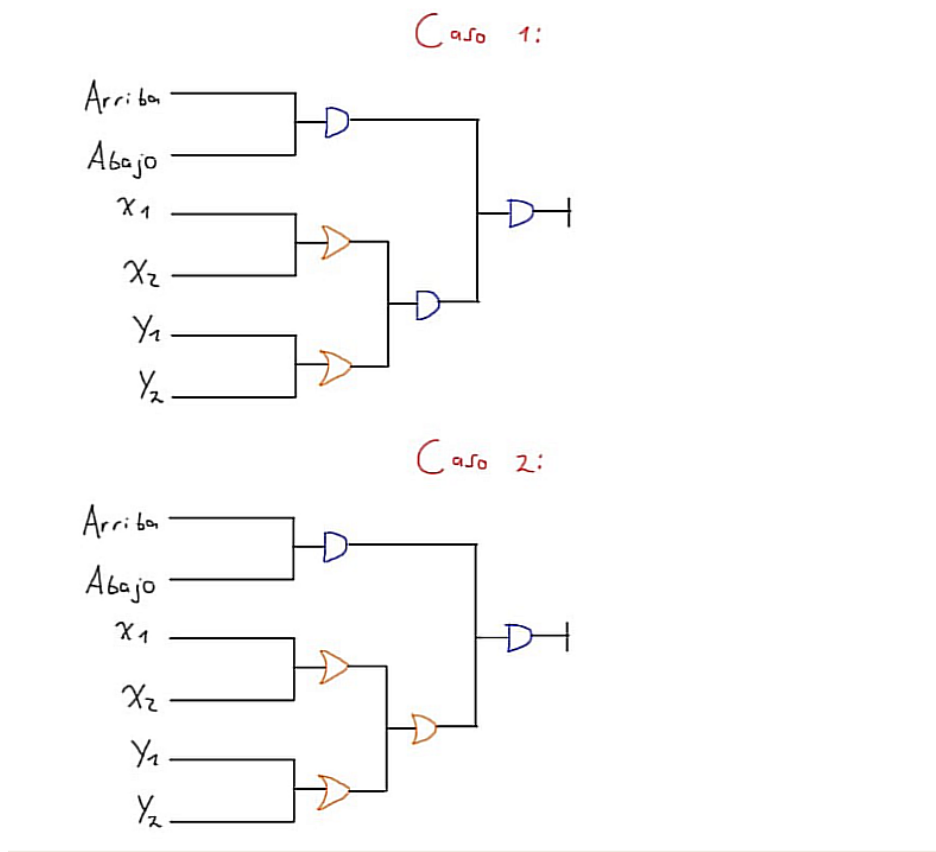
**Figura 7:** La figura presenta el montaje experimental realizado para cuatro fibras. En ella, se visualiza la disposición de la matriz con las dos paletas centelladoras ubicadas en la parte superior e inferior del esquema. En el centro, se encuentra la placa centelladora conectada a cada fibra, y estas últimas están a su vez conectadas, cada una, a un respectivo PMT (Tubo Fotomultiplicador)

Las conexiones serán muy similares, con la diferencia de que, en esta ocasión, se usarán cuatro fibras ópticas, respetando el montaje de la Figura 8. Además, se evaluarán dos nuevos casos de conexiones para medir dos eficiencias adicionales, dado que ya se conoce la eficiencia individual de cada fibra.



**Figura 8:** La figura presenta las conexiones realizadas en el crate con el propósito de determinar la eficiencia de las fibras en relación con la doble coincidencia. En la representación, se identifican los módulos esenciales y las interconexiones establecidas entre cada uno. El módulo discriminador desempeña la función de filtrar el voltaje para reducir el ruido intrínseco de cada fotomultiplicador, permitiendo así la obtención de señales exclusivas asociadas a los muones. El fan-in/fan-out opera para duplicar señales, facilitando la distribución hacia varios módulos. Por su parte, el delay generator genera un retardo en la señal de entrada, mientras que la unidad lógica posibilita la observación de coincidencias en lógica OR o AND, según sea el caso que se desee analizar. Finalmente, el dual channel bcd scaler cumple la función de contar cada pulso de señal, siendo fundamental para determinar la eficiencia de las fibras en el contexto de la doble coincidencia.

Como se mencionó anteriormente, se evaluará la eficiencia en dos casos distintos. El primero tiene como objetivo comparar las detecciones en los ejes X e Y y, a su vez, comparar esta información con la doble coincidencia de las paletas ubicadas arriba y abajo. El segundo caso implica comparar la detección de cualquiera de las cuatro fibras con la doble coincidencia y analizar cuánto aumenta la eficiencia. Para esquematizar cada uno de estos casos, resulta útil observar el diagrama de la Figura 9, que muestra las conexiones planificadas para llevar a cabo estos procedimientos.



**Figura 9:** La figura presenta los casos de conexiones que fueron evaluados para las cuatro fibras ópticas conectadas a la placa centelladora. En el primer caso, se observa una relación que realiza una operación AND entre las fibras de X, es decir, el momento en que ambas fibras de X detectaron un muón, y compara este resultado usando una operación OR con la relación que realiza un AND entre las fibras de Y, es decir, el momento en que ambas fibras de Y detectaron un muón. Todo este proceso, es decir, la operación OR, se compara con la doble coincidencia de las paletas arriba y abajo. En el segundo caso, se muestra una relación en OR con todas las fibras, es decir, donde cualquier fibra detectó un muón, y se compara directamente con la doble coincidencia.

De este modo, al pasar las señales amplificadas y discriminadas, se llevan a cabo dos casos de mediciones. En el primero, se conectan a la unidad lógica en AND las fibras de X, es decir, en el momento en que ambas fibras de X detectan un muón, y se realiza el mismo procedimiento para Y, conectando en AND las fibras de Y, es decir, en el momento en que ambas fibras de Y detectan un muón. Estos dos casos se comparan en otro puerto de la unidad lógica mediante un OR, que indica que cada vez que haya una medición, ya sea en X o en Y, se tomará el dato. Este OR se conecta nuevamente en otro AND con la doble coincidencia,



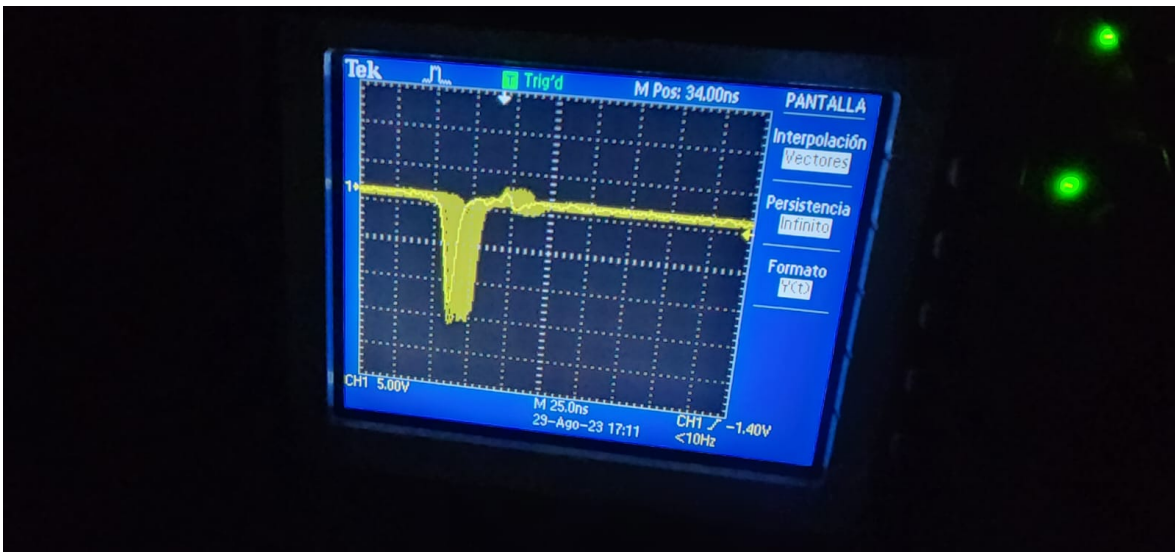
dictando pulsos cada vez que se detecta algo, ya sea en X o en Y, en relación con la doble coincidencia.

Para el segundo caso, se conectan todas las fibras pasadas por el discriminador y amplificadas en la unidad lógica en un OR, indicando que cada vez que se detecte un muón, independientemente de en qué fibra ocurra, se tomará el conteo. Este OR entre las cuatro fibras se une a un AND con la doble coincidencia. Cada uno de los casos correspondería individualmente a una triple coincidencia, y los conteos de esta se compararán con los conteos de la doble, cuidando siempre que el delay sea el adecuado, tal como se mostró en la figura 4.

### 3. Resultados y Análisis

#### 3.1. Funcionamiento PMT

Para confirmar el correcto funcionamiento del fotomultiplicador, la parte del procedimiento experimental dedicada a esta etapa debería exhibir un pulso sencillo en descenso, tal como se ilustra en la figura 10.



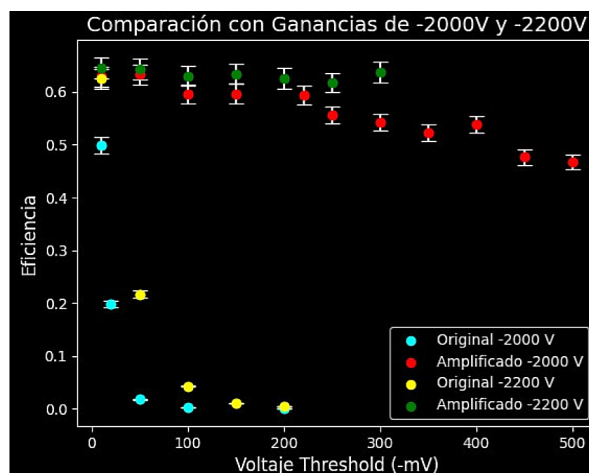
**Figura 10:** La imagen exhibe un pulso característico del fotomultiplicador al detectar señales de luz. Este pulso presenta una pendiente negativa, atribuible a la polaridad asignada al sistema. La presencia de este pulso característico sirve como verificación de la efectividad del Fotomultiplicador (PMT) en la detección de señales lumínicas.

### 3.2. Mejor Voltaje Threshold

La eficiencia ( $\epsilon$ ) para determinar el mejor voltaje umbral, después de realizar las conexiones pertinentes, se puede calcular a partir de los recuentos en el módulo dual channel bcd scaler para la triple y la doble coincidencia. Como se explicó en la sección de montaje experimental, la intención de estos recuentos es utilizar la doble coincidencia como referencia al cien por ciento y calcular el porcentaje de eficiencia para la triple coincidencia en relación con este cien. Este enfoque proporciona una representación del cambio en los valores debido a los pulsos de la fibra, mostrando cuántos muones detecta la fibra en coincidencia con las dos paletas. Con las conexiones claras, el procedimiento para la toma de datos y esta información adicional, la eficiencia ( $\epsilon$ ) se puede calcular fácilmente de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{\text{ConteosTripleCoincidencia}}{\text{ConteosDobleCoincidencia}} \quad (3.1)$$

A partir de esta ecuación (3.1), es posible evaluar cada valor de eficiencia para cada voltaje umbral en el rango de 10 – 500 mV. Se lleva a cabo este cálculo a lo largo de este intervalo de voltajes de discriminación para distintos voltajes de la fuente, variando entre 2000 – 2300 V. Estos cálculos se realizan tomando la señal tanto con como sin pasar por el módulo de amplificación del crate. De esta manera, al obtener los valores y representar gráficamente la eficiencia en función del voltaje umbral, se obtienen los siguientes resultados:



**Figura 11:** La figura presenta las eficiencias calculadas utilizando la fórmula de la ecuación 3.1 para diversos voltajes umbral, en un rango comprendido entre 10 y 500 milivoltios. La representación gráfica exhibe diferentes curvas, cada una correspondiente a voltajes aplicados al fotomultiplicador de 2000 y 2200 voltios en polaridad negativa. La etiqueta "ORIGINAL" en la imagen indica que la señal no fue amplificada, mientras que las curvas sin esta etiqueta representan señales de la fibra amplificadas en su respectivo módulo. Voltajes de 2300 no se incluyeron en la representación debido a su mínima variación en eficiencia con respecto a los de 2200.

Al analizar los datos obtenidos de la figura 11 y considerando que se descartó el valor de 2300V, se evidencia la necesidad de amplificar las señales de las fibras para optimizar su eficiencia. Se destaca la elección de 2200V, ya que en este punto se alcanzan valores de eficiencia significativamente altos. La decisión de descartar tanto la configuración de 2300V como voltajes superiores a los PMTs se basa en la observación de que la diferencia en eficiencia con respecto a 2200V no es sustancial, mientras que el riesgo de dañar el fotomultiplicador aumenta debido a la mayor sensibilidad asociada con voltajes más altos.

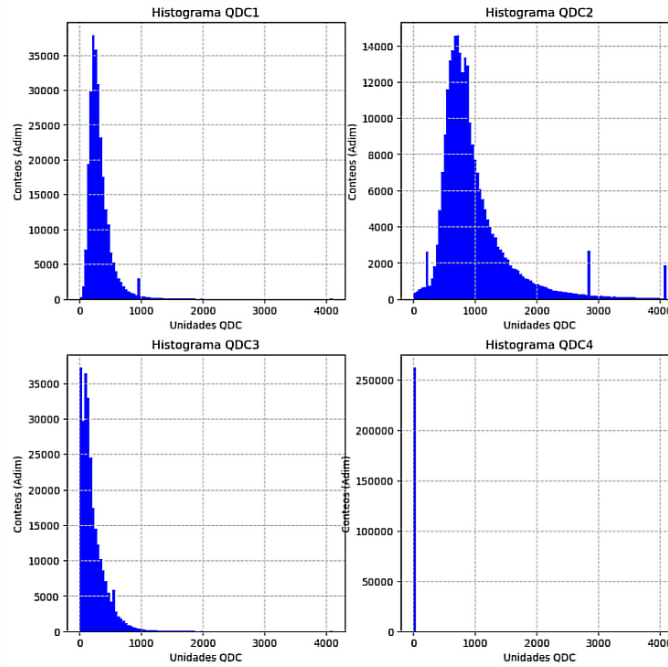
Al enfocarse únicamente en los valores de voltaje umbral, se observa claramente que a menor voltaje se logra una mayor eficiencia. No obstante, se decidió no seleccionar el valor mínimo debido al interés de reducir el ruido del fotomultiplicador filtrando parte de su señal. En consecuencia, se determinó que el voltaje óptimo de discriminación para el funcionamiento de las fibras es de 100mV.

### 3.3. Histogramas TDC y QDC para una fibra

Una vez efectuadas las conexiones en el CAMAC para los canales de TDC y QDC, conforme se detalló en la sección del montaje experimental, procedemos a la toma de datos.

Para ello, se realiza la conexión de un computador con el programa de adquisición de datos LabView al CAMAC. Se especifican los puertos en los que se ubican los módulos TDC y QDC, así como los canales a los que se conectaron las fibras en cada módulo respectivamente. Se elige un tiempo de medición, que en este caso, para una sola fibra, fue de 8 horas. El sistema proporciona datos numéricos para las mediciones realizadas durante ese lapso.

Dado que la información realmente relevante para analizar la eficiencia de la fibra en comparación con las dos paletas centelladoras (superior e inferior), que constituye el objetivo principal, se encuentra en el QDC, nos centramos exclusivamente en estos valores. Posteriormente, creamos gráficos de los histogramas QDC correspondientes.



**Figura 12:** En la gráfica presentada, se pueden apreciar los diagramas QDC correspondientes a las paletas centelladoras superior e inferior, así como a la fibra bajo análisis. Estos diagramas deberían exhibir una forma de Landau, que se asemeja a una distribución gaussiana, pero con una cola más extensa al final de la campana. Es importante señalar que para lograr una forma de Landau, la eficiencia de la fibra debe ser del cien por ciento. A medida que la eficiencia disminuye, se observa en la gráfica un cierto corte, indicando la pérdida de eficiencia en comparación con el cien por ciento. En este contexto, el valor del cien por ciento debería corresponder a la doble coincidencia que ingresó en el gate.

A partir de la Figura 12, se observa que todas las gráficas, excepto la ubicada en la parte inferior derecha, tienen una forma de Landau, aunque algunas presentan cortes más pronunciados que otras. Este fenómeno se debe a que el diagrama QDC proporciona una

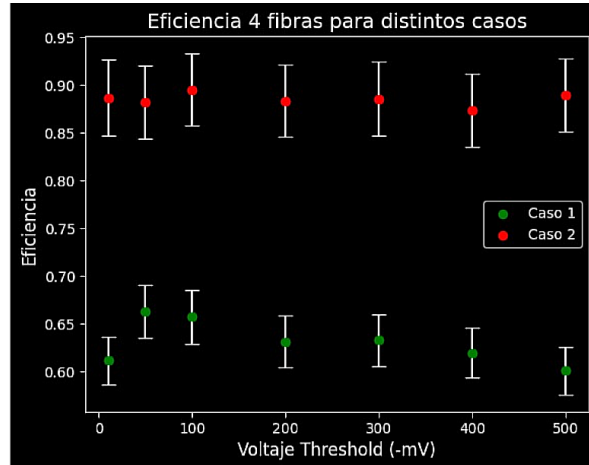
medida cualitativa de la eficiencia. Cuanto más se asemeje la gráfica a una campana completa de Landau, más cercana estará al cien por ciento en comparación con el parámetro de entrada, que en este caso es la doble coincidencia.

La gráfica en la esquina superior derecha es la que mejor conserva esta forma y corresponde a la paleta superior, que contribuye significativamente a la comparación con la doble coincidencia. La segunda gráfica que mantiene la forma de Landau es la ubicada en la esquina superior izquierda, correspondiente a la paleta inferior, ya que también se utiliza en la formación de la doble coincidencia. La reducción en su gráfica se debe a su posición más baja, lo que permite que algunos muones se desintegren antes de alcanzarla, además de la posibilidad de desviaciones en los ángulos de inclinación.

Finalmente, la gráfica más relevante es la tercera, en la esquina inferior izquierda, correspondiente a la fibra. Indica que lee un porcentaje en comparación con el total de la doble coincidencia, por lo que muestra un corte más pronunciado, cualitativamente aproximado al sesenta por ciento. Esto respalda de manera coherente las eficiencias medidas en la Figura 11.

### **3.4. Eficiencia de Casos Considerados**

Como se explicó en la sección del montaje experimental, se evaluarán dos casos distintos, cada uno tratado como una triple coincidencia, y se compararán con la doble coincidencia entre las paletas de arriba y abajo. Aunque son casos diferentes en términos de conexiones, el cálculo de la eficiencia se realiza de manera casi idéntica al de la ecuación 3.1. Realizando los cálculos a distintos voltajes thresholds y teniendo en cuenta que ya se calculó el voltaje óptimo para el fotomultiplicador, procedemos a determinar la eficiencia para cada caso ante cada valor de discriminación, obteniendo la siguiente gráfica:

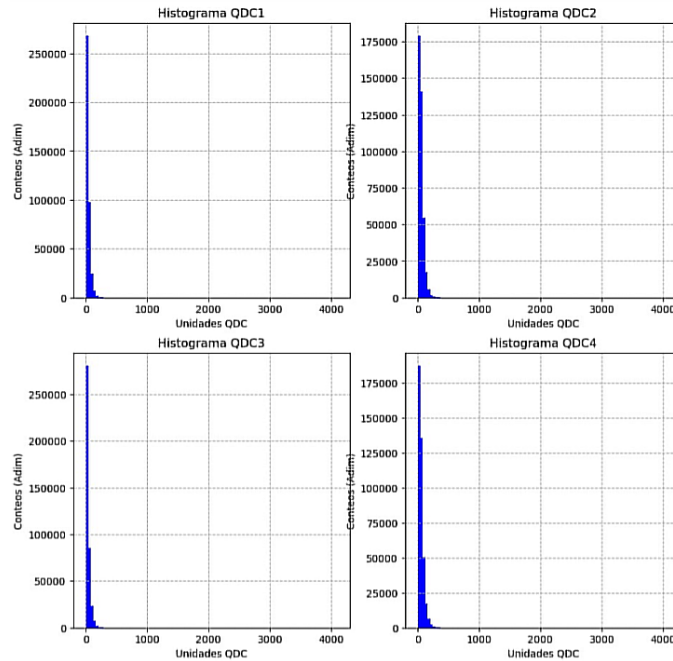


**Figura 13:** La figura presenta las eficiencias calculadas utilizando la fórmula de la ecuación 3.1 para diversos voltajes umbral, en un rango comprendido entre 10 y 500 milivoltios. La representación gráfica exhibe dos diferentes curvas donde cada una corresponde a un caso de la figura 9. Para esta medición de eficiencias se asumió que el voltaje óptimo del fotomultiplicador es de 2200V con polaridad negativa.

A partir de esta gráfica (figura 13), se puede observar las eficiencias de cada caso, lo que concuerda con las expectativas. En el caso 1, donde se imponen más condiciones, se esperaba una disminución en la eficiencia, mientras que en el caso 2 se preveía un aumento al considerar cualquier fibra. Esto permite concluir que la placa con varias fibras, recopilando información de cualquier muón que impacte en ella, es muy eficiente.

### 3.5. Histogramas TDC y QDC para las cuatro fibras

Para este caso, las conexiones son exactamente las mismas que para una sola fibra, solo que se conectan a más canales tanto de TDC como de QDC, como se muestra en la figura 5. Estas gráficas deben ser muy similares a la gráfica inferior izquierda de la figura 12, de manera que son Landaus cortadas, mostrando una eficiencia cercana al sesenta por ciento. Esto es menos apreciable, ya que el tiempo de toma de datos fue mucho mayor, generando picos más altos y, por tanto, mostrando menos la cola de la campana, como se evidencia en la siguiente figura:



**Figura 14:** En la gráfica presentada, se pueden apreciar los diagramas QDC correspondientes a las cuatro fibras bajo análisis. Estos diagramas deberían exhibir una forma de Landau, que se asemeja a una distribución gaussiana, pero con una cola más extensa al final de la campana. Es importante señalar que para lograr una forma de Landau, la eficiencia de la fibra debe ser del cien por ciento. A medida que la eficiencia disminuye, se observa en la gráfica un cierto corte, indicando la pérdida de eficiencia en comparación con el cien por ciento. En este contexto, el valor del cien por ciento debería corresponder a la doble coincidencia que ingresó en el gate.

A partir de la figura 14 podemos concluir que cada una de las fibras se comporta según lo esperado.

## 4. Conclusiones

Tras un exhaustivo análisis del funcionamiento de las fibras ópticas, los resultados obtenidos confirman su desempeño óptimo, manteniendo la eficiencia de la placa centelladora muy cercana a las especificaciones establecidas por el fabricante. Este hallazgo sugiere que el rango de emisión y absorción de la fibra está en sintonía con los parámetros esperados por el módulo fotomultiplicador (PMT), validando así su idoneidad para su implementación en el sistema.

En el caso de una sola fibra, se determinó que el voltaje umbral adecuado para alcanzar la eficiencia recomendada por el fabricante para el bloque centellador es de -100 mV. Cabe destacar que, al variar el voltaje umbral en el rango de 0 a -500 mV, se observó que la eficiencia se mantiene relativamente constante, indicando una robustez en el rendimiento del sistema ante variaciones en este parámetro.

En el primer escenario evaluado, la eficiencia se mantuvo sorprendentemente alta, alcanzando aproximadamente el 0.88. Sin embargo, surgió un inconveniente significativo relacionado con el tiempo de toma de datos, que fue de un minuto por cada umbral de voltaje. En el segundo caso, la eficiencia fue de alrededor del 0.63, aunque se anticipa que esta cifra pueda disminuir a medida que se incrementa el umbral de voltaje. Se reconoce que este error está vinculado al mismo factor en ambos casos y se presenta como un aspecto a abordar en futuras investigaciones para optimizar la eficiencia en situaciones de mayor demanda temporal.

En resumen, los resultados obtenidos subrayan la viabilidad y eficacia de las fibras ópticas en el contexto del proyecto, proporcionando valiosa información sobre su rendimiento bajo diversas condiciones. Estos hallazgos sientan las bases para futuras mejoras y refinamientos en el diseño experimental, destacando la importancia de considerar no solo la eficiencia intrínseca de las fibras, sino también los desafíos temporales asociados con la toma de datos.

## Referencias

- [1] M. Nave. Leptons, s.f. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Particles/lepton.htmlc3>.
- [2] Cristian Borja, Carlos Ávila, Gerardo Roque, and Manuel Sánchez. Atmospheric muon flux measurement near earth's equatorial line. *Instruments*, 6(4), 2022. <https://www.mdpi.com/2410-390X/6/4/78>.
- [3] Ralf Kaiser. Muography: overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137):20180049, 2019.
- [4] Luis Alvarez, Jared Anderson, F. Bedwei, James Burkhard, Ahmed Fakhry, Adib Girgis, Amr Goneid, Fikhry Hassan, Dennis Iverson, Gerald Lynch, Zenab Miligy, Ali Moussa, Mohammed Sharkawi, and Lauren Yazolino. Search for hidden chambers in the pyramids. *Science (New York, N.Y.)*, 167:832–9, 03 1970.
- [5] Kunihiro Morishima, Mitsuaki Kuno, Akira Nishio, Nobuko Kitagawa, Yuta Manabe, Masaki Moto, Fumihiko Takasaki, Hirofumi Fujii, Kotaro Satoh, Hideyo Kodama, et al. Discovery of a big void in khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552(7685):386–390, 2017.
- [6] HIP Institute and Cairo University. ScanPyramids, s.f. <http://www.scanpyramids.org/>.



- [7] Nicholas Tsoufanidis and Sheldon Landsberger. *Measurement and detection of radiation*. CRC press, 2021.
- [8] Universidad de Buenos Aires. Centelladores. s.f.
- [9] Caterine Yesenia Carrasco-Montesdeoca and María Fernanda Heredia-Moyano. Centelladores plásticos orgánicos para detección de muones: una revisión. *Polo del Conocimiento*, 6(12):1698–1712, 2021.
- [10] Brian Wundheiler. Instrumentación en física de altas energías, s.f.
- [11] Hamamatsu Photonics K.K. *Photomultiplier Tubes - Basics and Applications*. Hamamatsu Photonics K.K, 4 edition, 2017.
- [12] M. Nave. Funciones de Trabajo en el Efecto Fotoeléctrico, s.f.  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/photoelec.html>.
- [13] Hamamatsu Photonics K.K. Photomultiplier tube assembly h6410, s.f.  
<https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/pmt/pmt-assembly/head-on-type/H6410.html>.
- [14] Mauro Javier Bonilla. Sistema de adquisición de datos para la caracterización de fotomultiplicadores para experimentos de altas energías, Enero 2013.
- [15] Máximo Coppola and Mariano Santaya. Pmt y centelladores, Abril 2014. Universidad de Buenos Aires.
- [16] Nick Connor. ¿qué es el fotocatodo y los dinodos en el tubo fotomultiplicador? definición, Marzo 2020.
- [17] Carlos Ávila and Manuel Sanchez. Proposal: Uniandes muon telescope. 2023.

## Apéndice de Cálculo de Errores

El cálculo de incertidumbres y errores en el presente informe giró en torno al siguiente teorema estadístico:

**Teorema 1.** Sea  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  una función que depende de  $n$  variables cada una con incertidumbre  $\sigma_n$ . Entonces, la incertidumbre de la función está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2}.$$

Este teorema facilita el cálculo del error asociado a las eficiencias. Considerando que la eficiencia puede expresarse como

$$\varepsilon = \frac{N}{N + y},$$

donde  $N$  representa el número de triples coincidencias y  $y$  denota la cantidad adicional necesaria para que la triple coincidencia se convierta en la cantidad de conteos de la doble coincidencia. Teniendo en cuenta esta formulación, se puede concluir que:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial N}\right)^2 N + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)^2 y} = \sqrt{\frac{Ny}{(N+y)^3}}$$