

# Construcción de un sistema de detección de partículas para su aplicación en la enseñanza de física de partículas

Construction of a particle detection system for its application in the teaching of particle physics

Jairo Rodríguez <sup>1\*</sup>, David A. Martínez Caicedo <sup>1</sup>, Alex Tapia <sup>2</sup>, Denis Torres <sup>3</sup>, Tatiana Cusis <sup>3</sup>, Jhon Revelo <sup>3</sup>, Alex Riascos <sup>3</sup> y Danny Benavides <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Physics department, Physics, South Dakota School of Mines and Technology, 501 E St Joseph St, Rapid City, SD 57701, Estados Unidos.

<sup>2</sup>Facultad de ciencias básicas, Universidad de Medellín, Carrera 87 N.º 30–65, Medellín, Colombia.

<sup>3</sup>Facultad de ciencias exactas y naturales, Física, Universidad de Nariño, Calle 18 N.º 50–02, Pasto, Colombia.

\*E-mail: [jairohernan.rodriguezrondon@mines.sdsmt.edu](mailto:jairohernan.rodriguezrondon@mines.sdsmt.edu)

Recibido el 12 de junio de 2022 | Aceptado el 22 de septiembre de 2022

## Resumen

En este artículo se presenta una descripción detallada de la construcción de un sistema básico de detección de partículas. Esta construcción podrá ser replicada en diferentes instituciones de educación universitaria o media. Además, se presenta una comparación entre dos diseños de sistemas de detección de partículas usando como material de detección el centellador plástico. El primer sistema de detección consiste de una barra plástica centelladora con dos fotomultiplicadores de silicio, cada uno con área de 6x6 mm<sup>2</sup>. El segundo sistema de detección consiste de una barra plástica centelladora, un fotomultiplicador de silicio con área de 3x3 mm<sup>2</sup>, y una fibra óptica de corrimiento de longitud de onda ubicada dentro de la barra centelladora. La comparación entre los dos sistemas de detección favorece la segunda opción de diseño, que muestra más eficiencia en la detección de las partículas. La metodología descrita en este artículo puede ser aplicada en la enseñanza de la física de detectores de partículas elementales.

**Palabras clave:** Barra centelladora; SiPM.

## Abstract

This article presents a detailed description for the construction of a basic particle detection system. The construction could be easily replicated in different universities or high school institutions. Furthermore, it is presented a comparison between two designs of particle detection systems using plastic scintillator as particle detection material. The first particle detection system consisted of a plastic scintillator bar with 6x6 mm<sup>2</sup> silicon photomultipliers. The second system consisted of a plastic scintillator bar with one 3x3 mm<sup>2</sup> silicon photomultiplier, and a wavelength shifter fiber within the scintillator bar. The comparison between both systems favors the second design option, which have a better particle detection efficiency. The methodology presented in this article can be applied on the teaching of particle physics.

**Keywords:** Plastic scintillator bar; SiPM.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro del área de física de partículas es muy importante entender cómo estas partículas depositan energía en un material sensitivo y cómo esta energía es convertida en señal electrónica analógica para luego ser digitalizada, procesada y analizada. El método básico de detección de partículas elementales puede enseñarse en distintas facultades de ciencias básicas o instituciones educativas de enseñanza media a un bajo costo. Esto sirve para el desarrollo de prototipos de detectores de partículas escalables hasta  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  para estudios físicos más avanzados. Estos detectores pueden usar como material sensitivo el centellador plástico y como sistema de detección de luz los fotomultiplicadores de silicio (SiPM, por sus siglas en inglés). El desarrollo de estos prototipos tiene el potencial de incrementar la experiencia de los estudiantes que pertenecen a grupos de investigación, para contribuir, en un futuro cercano, a diversos experimentos científicos avanzados en física de altas energías.

Las creencias y actitudes de los estudiantes representan un aspecto importante en el proceso de aprendizaje de la física (Rada Crespo *et al.*, 2022). Estos autores proponen, para mejorar los niveles de creencias hacia la física, así como el rendimiento de los estudiantes, practicar metodológicas activas tales como el diseño y la construcción de montajes o artefactos que impliquen principios físicos. El uso de metodologías activas ha resultado muy exitoso en la formación de ingenieros (Rodríguez Serrano *et al.*, 2012) y también de la enseñanza de la física. Entre las metodologías relevantes en el desarrollo de actitudes favorables, se encuentra el aprendizaje orientado a proyectos, que consiste en involucrar a los estudiantes en proyectos reales o multidisciplinarios que propicien la aplicación de lo que se ha aprendido. Así mismo, la actividad experimental en los cursos de física es un espacio para aplicar de manera directa las leyes de la física lo cual puede llegar a ser una herramienta poderosa para el aprendizaje.

Los detectores construidos con material centellador plástico son de los más económicos dentro de las posibilidades existentes para el uso de material sensitivo. Esto es una ventaja para la enseñanza de la física de partículas en países en vía de desarrollo. También permiten una fácil manipulación y no es preciso tener en cuenta la variación de temperatura, presión o campo magnético, es decir ninguna variable dependiente del ambiente en el que se encuentra el detector.

Este trabajo presenta una propuesta pedagógica que aplica una metodología activa en el laboratorio, para afianzar los conceptos de física y electrónica básica, enseñando cómo construir un detector de partículas básico con material de bajo costo. Se emplea un centellador plástico en forma de barra, fibra óptica de corrimiento de longitud de onda y fotosensores.

## II. ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO

En esta sección se dará una detallada descripción de los materiales que fueron utilizados para la comparación entre la barra plástica de material centellador con y sin fibra óptica de corrimiento de longitud de onda (*wavelength shifting fiber*, WLS).

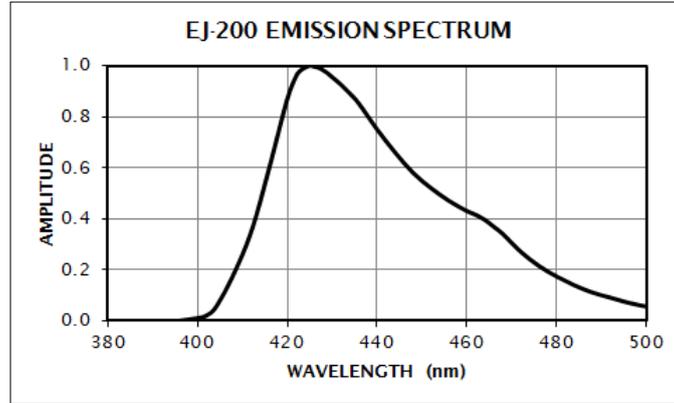
### A. Barras centelladoras

En la detección de partículas es importante seleccionar un material que permita que las partículas depositen energía para posteriormente transformarla en una señal electrónica. Este trabajo es realizado por el material centellador. El centellador plástico combina dos propiedades importantes: una variación mínima en la señal óptica al escalar el detector y rápida respuesta en tiempo a las señales de luz. Esta última propiedad se utiliza para conocer el tiempo de emisión de luz para centelladores.

**TABLA I.** Propiedades material centellador EJ-200 (ELJEN Technology, 2021).

Eficiencia de centelleo (fotones/1MeV e <sup>-</sup> )	10000
Long. de onda de emisión máx (nm)	425
Long. de atenuación de luz (cm)	380
Tiempo de subida (ns)	0.9
Tiempo de decaimiento (ns)	2.1
Ancho de pulso, FWHM (ns)	2.5
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.023
Base de polímero	Polivinilotueno
índice de refracción	1.58
Presión de vapor compatible	Vacío
Coef. expansión lineal	$7.8 \times 10^{-5}$ debajo 67°C

Es importante tener en cuenta la longitud de onda de emisión de luz de la barra centelladora. Para nuestro estudio se eligió la barra de referencia EJ-200 porque tiene su valor máximo de emisión en una longitud de onda de 425 nm (en la tabla I se muestra otras propiedades del material centellador EJ-200). Este máximo debe estar cerca al valor máximo de la longitud de onda de la eficiencia de foto-detección del sensor. En la figura 1 se muestra el espectro de emisión de luz de la barra centelladora de referencia EJ-200.

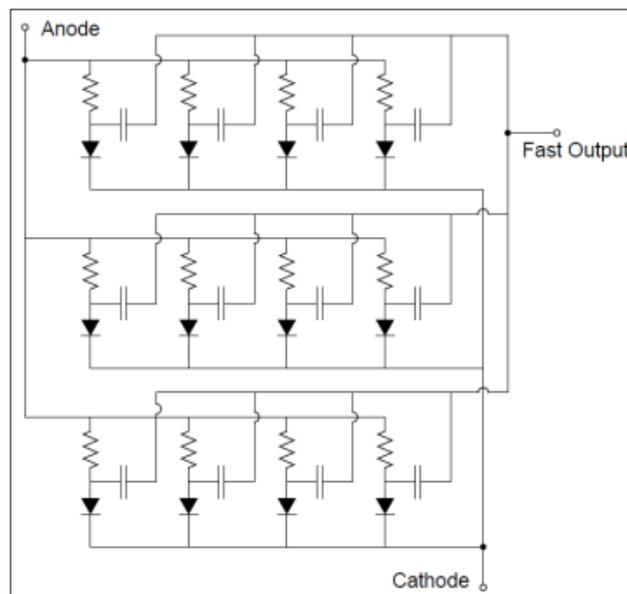


**FIGURA 1.** Espectro de emisión de luz del centellador plástico EJ-200 con un máximo en 425 nm, tomada de ELJEN Technology (2021).

**B. Fotomultiplicador de Silicio (SiPM)**

Un fotomultiplicador de silicio o SiPM es un sensor capaz de detectar, sincronizar y cuantificar señales luminosas de baja intensidad. Los SiPM son dispositivos fotodetectores semiconductores que aún están en fase de desarrollo. Tienen una estructura con base en la integración de microcélulas idénticas e independientes que responden a la interacción de un solo fotón cada una. Cada microcélula está formada por un fotodiodo de avalancha funcionando en modo Geiger en serie con una resistencia denominada resistencia de quenching. Esta resistencia tiene un valor elevado con el fin de limitar la corriente y detener el proceso de avalancha (SensL, 2018).

Ya que la respuesta de cada microcélula se limita a un solo fotón, se agrupan una gran cantidad de microcélulas en una estructura en paralelo (figura 2), de modo que la corriente de salida es la suma de las corrientes generadas en todas las microcélulas. Esto permite al SiPM contar el número de fotones incidentes (SensL, 2018).



**FIGURA 2.** Matriz de microcélulas de un SiPM, tomada de (SensL, 2018).

En este experimento, para leer y convertir señales de luz generadas dentro del centellador a una señal eléctrica, se utilizaron dos series de fotomultiplicadores. El SiPM de la serie 60035 con un tamaño de sensor de 6 mm, área activa de 6x6 mm<sup>2</sup>, número de microcélulas de 18980, y un factor de llenado de microcélulas de 64 %. Por otra parte, el SiPM de la serie 30035 con un tamaño de sensor de 3 mm, un área activa de 3x3 mm<sup>2</sup>, número de microcélulas de 4774, y un factor de llenado de microcélulas de 64 % (SensL, 2014).

### C. Fuente radioactiva

Una vez definido el material centellador para la detección de partículas y cómo se harán la lectura y la conversión de las señales de luz a una señal eléctrica, se procedió a utilizar una fuente radioactiva para generar el flujo de partículas que interaccionaran con el material de centellador.

En este experimento, se utilizó una fuente radioactiva Cesio-137, un isótopo radiactivo de cesio que se produce principalmente por fisión nuclear y tiene una actividad de 5μCi, que indica la cantidad de material radioactivo que decae por segundo. Además, presenta una vida media de 30,07 años, y en su periodo de semidesintegración decae emitiendo partículas beta a un isómero nuclear metaestable de Bario-137m (figura 4). Este isómero es estable, tiene una vida media de 2,55 minutos y es el responsable de todas las emisiones de rayos gamma con una energía de  $E_{\gamma} = 0.6617$  MeV (Spectrum Techniques, 2016).



FIGURA 3. Fuente radioactiva Cs-137.

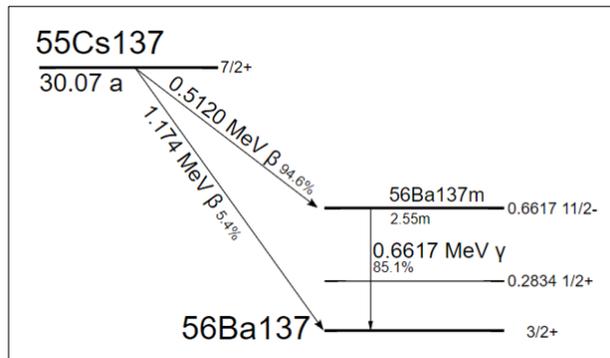


FIGURA 4. Esquema de desintegración del Cs-137, tomada de (Spectrum Techniques, 2016).

### D. Fibra óptica de corrimiento de longitud de onda

Estas fibras ópticas centellantes y de corregimiento de longitud de onda WLS son usadas para aplicaciones como imágenes de neutrones, discriminación de partículas, calorímetros, telescopios de rayos cósmicos, sistemas de imágenes en tiempo real, celdas de flujo y detectores de seguimiento.

La fibra utilizada en este experimento es aquella con referencia BCF-12 de Saint-Gobain, la cual posee una emisión luz con longitud de onda corrida hacia el color azul, con un pico de emisión de 425 nm, cuenta con un tiempo de decaimiento de 3,2 ns, con una percepción de fotones de aproximadamente 8000 MeV de una partícula ionizante mínima. Es así que la eficiencia de captura permite la recolección de menos del 4 % de los fotones para su paso por la fibra y contiene una transmisión mejorada para su uso en longitudes largas.

Además, el núcleo centellante contiene una combinación de dopantes fluorescentes seleccionados para producir el centelleo deseado y las características ópticas y de resistencia a la radiación (Saint-Gobain Crystals, 2017-2021).

### E. Otros materiales

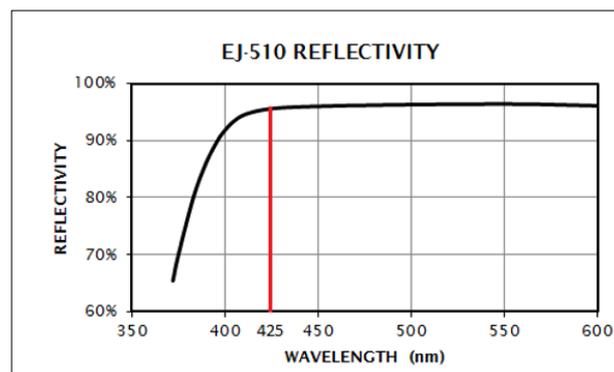
Dentro del montaje para el detector sin fibra WLS, se utilizó una pintura reflectiva para centelladores plásticos de referencia EJ-510 (ver figura 5).

Esta es una pintura que consta de un pigmento de dióxido de titanio y una base de pintura soluble en agua seleccionada por su excelente resistencia al amarilleo y buena adhesión (ELJEN Technology, 2021).



**FIGURA 5.** Pintura reflectiva EJ-510.

La máxima reflectividad de esta pintura (ver figura 6) se logra mediante la aplicación de tres capas de revestimiento de 0,11mm, con una densidad típica de la capa seca de 13 mg/cm<sup>2</sup>. Esta pintura emplea una mezcla de pigmentos seleccionados también para mejorar la reflectividad de los centelladores de longitud de onda más larga con emisiones verdes. Además, entre su composición se cuenta con 6,71x10<sup>19</sup> átomos de Ti por cm<sup>2</sup>, 1,12x10<sup>20</sup> átomos de C por cm<sup>2</sup>, 2,25 x10<sup>20</sup> átomos de H por cm<sup>2</sup> y finalmente 1,90 x10<sup>20</sup> átomo de O por cm<sup>2</sup> (ELJEN Technology, 2021).



**FIGURA 6.** Reflectividad de la pintura EJ-510. Se marca el valor de la longitud de onda con un valor de 425 nm, tomada de (ELJEN Technology, 2021).

Para lograr ensamblar de una manera adecuada la fibra WLS con la barra centelladora se utilizó una resina de referencia EJ-500 (ver figura 7) que sirve para unir ópticamente centelladores de plástico, guías de luz acrílicas (PMMA) y centelladores a base de PVT o poliestireno. Además, esta resina ofrece una buena adherencia sobre diferentes tipos de elementos, tiene un índice de refracción de 1,57, un buen grado de flexibilidad que lo hace útil para unir ópticamente vidrios o los plásticos anteriores a ventanas de vidrio. Para la máxima transmisión óptica es aplicada a una capa de 0,125 mm de espesor en comparación con el aire (figura 8).



FIGURA 7. Material adherente.

El EJ-500 completa su proceso de curado a una temperatura ambiente de 20°C con una vida útil de 60 minutos. Por otra parte, el cemento mezclado tarda de 3 a 4 horas en fraguar y 24 horas en endurecerse, y para lograr el empalme completo se necesitan de 2 a 3 días.

Este material adherente posee las siguientes propiedades: Viscosidad mixta de 800 cps, fuerza de unión de 1800 psi, fuerza dieléctrica de 420 vol/mil, gravedad específica 1,17, temperatura desde -60° hasta +105°C, coeficiente de expansión térmica de  $7,2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ .

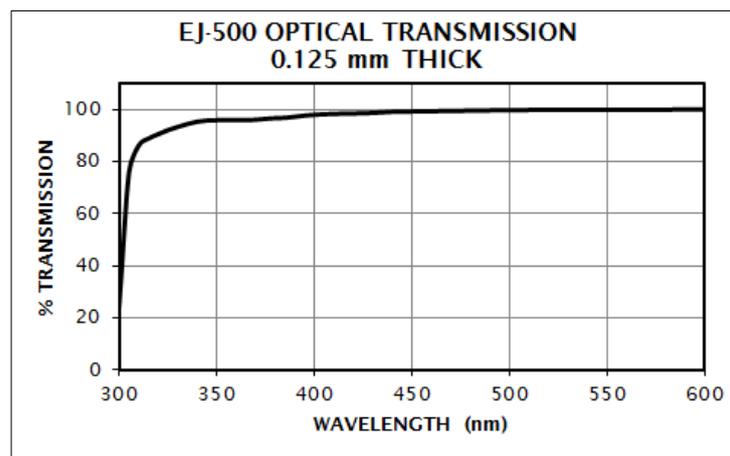


FIGURA 8. Espectro de transmisión máxima EJ-500, tomada de (ELJEN Technology, 2021).

### III. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Una vez el estudiante se familiariza con los elementos que componen el experimento, el siguiente paso dentro de nuestra metodología activa es entender el diseño del experimento, es decir entender el problema a resolver. Inicialmente se quiere establecer cuál de nuestros dos montajes genera mejores resultados, para lograr esto con ayuda de un fotosensor y una tarjeta electrónica mediremos la tasa de cuentas que genera una fuente radioactiva ubicada sobre el material centellador y a diferentes distancias de nuestro fotosensor. Obtendremos dos gráficas de datos que se ajustarán con un modelo teórico permitiendo decidir cuál montaje es mejor para detectar las partículas generadas en el material centellador.

Como se mencionó, para este experimento se realizaron dos montajes con diferentes características. El primero es un sistema de detección que contiene una barra centelladora de referencia EJ-200 con dos SiPM de  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  área cada uno (E. Technology, 2021). El segundo es un sistema de detección que contiene una barra centelladora, de la misma referencia anterior, pero con un solo SiPM de área  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ . Además, en el segundo sistema, a la barra centelladora se le agregó una fibra óptica WLS de referencia BCF-12 (Saint-Gobain Crystals, 2017-2021).

### A. Barra centelladora sin fibra WLS

Inicialmente, se recubrió la barra centelladora con pintura reflectante EJ-510. Esta pintura hace que los fotones producidos en la barra debido a la interacción entre el material centellador y el flujo de partículas generado por la fuente de radiación, sean reflejados dentro de la misma barra y no haya pérdida significativa de luz. La parte superior e inferior de la barra se dejó sin pintura reflectiva. Después, se aisló la barra de la luz exterior envolviéndola en una hoja aluminio y posteriormente se la cubrió con cinta negra.

La parte inferior de la barra fue aislada con una cinta de aluminio evitando así que los fotones producidos se reflejen o se transmitan. En la parte superior de la barra se ubicaron los SiPM serie 60035 de 6mm que estarán conectados a la *front end board* (FEB). La FEB tiene la función de proveer voltaje a los SiPM y digitalizar la señal de salida de los SiPM para posteriormente registrar y guardar la señal en un sistema de adquisición de datos (DAQ). Como ejemplos de FEB podemos encontrar dos equipos ampliamente usados tanto en investigación como enseñanza de la física: FemtoDAQ LV-2 (Skulski, Ruben, BenZvi, 2016) y QuarkNET (Rylander, Jordan, Paschke, Hans-Gerd Berns, 2010).



FIGURA 9. Barra del detector sin fibra WLS.

### B. Barra centelladora con fibra WLS

Para este caso, se utilizó una barra centelladora con un agujero en el centro de 2 mm de diámetro, por donde se pudo atravesar la fibra WLS de referencia BCF-12. Se utilizó la resina EJ-500 para que actúe como un medio de unión entre la barra centelladora y la fibra WLS, como se puede ver en la figura 10.



FIGURA 10. Barra del detector con fibra WLS.

Una vez que estaba pegada la fibra WLS con la resina en la barra centelleadora, se aisló la barra de la luz exterior envolviéndola nuevamente en una hoja de aluminio y posteriormente se la cubrió con cinta negra.

La figura 11 muestra el SiPM de 3 mm soldado a un circuito impreso. La fibra WLS fue acoplada a la superficie del SiPM de 3 mm. Se usó la FEB nuevamente para proveer el voltaje de operación y para registrar las señales obtenidas por el SiPM.

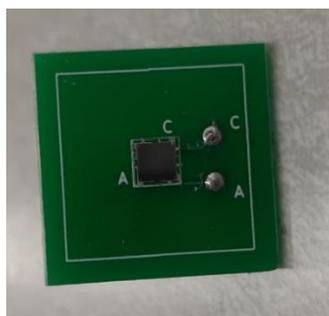


FIGURA 11. Fotomultiplicador de Silicio de 3mm.

#### IV. RESULTADOS

Al momento de realizar la toma de datos para cada uno de los dos sistemas de detección, se consideró el esquema que se muestra en la figura 12, donde se hizo uso de un solo canal de la *front end board* (Auger, 2016). Se inició con un tiempo de exposición de 5 minutos para cada una de las posiciones de la fuente de radiación sobre la barra centelleadora (con y sin WLS), donde el número de eventos registrados se presentan en la tabla II (sin fibra WLS) y en la tabla III (con fibra WLS) para poder realizar el respectivo análisis.

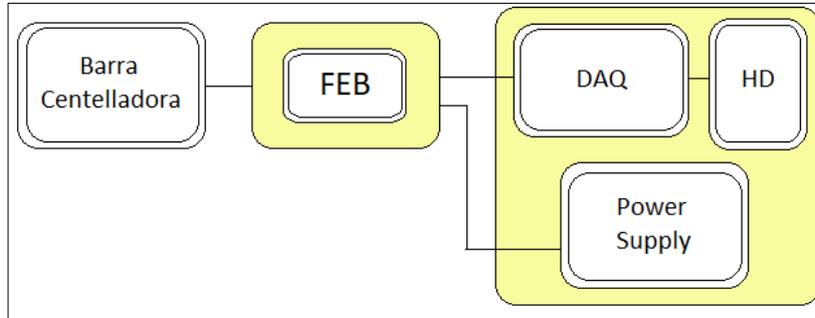


FIGURA 12. Sistema de adquisición de datos.

Teniendo en cuenta que cada una de las barras tiene una longitud de 24 cm, se localizó en cada barra 7 puntos con la misma distancia de separación entre ellos, tomando como punto inicial de referencia aquel localizado a 8 cm respecto a la ubicación de los SiPM (figura 13). La medida se inició ubicando la fuente de radiación en los 8 cm para evitar que los SiPM se activaran por cualquier señal diferente a la fuente de radiación.

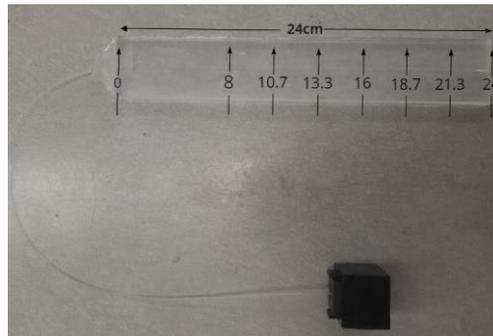


FIGURA 13. Barra centelleadora con posiciones en centímetros con respecto al SiPM.

Para el cálculo del cociente (tasa en tabla II, III), en ambos casos se tomó como referencia al primer punto de la posición (8 cm) con el objetivo de obtener una medida normalizada, y de este modo poder comparar los datos entre cada uno de los puntos. Las figuras 14 y 15 indican los resultados obtenidos. En cada punto de las gráficas se pueden ver los errores estadísticos. Para poder comparar el funcionamiento de los dos sistemas de detección de partículas (con y sin WLS) tomando en cuenta la propiedad de atenuación exponencial de la luz dentro de las barras centelleadoras, se utilizó una ecuación de la forma mostrada en (1) (Yang *et al.*, 2017) para realizar un ajuste de los datos obtenidos en cada sistema de detección.

$$R(x) \propto e^{\frac{-(x-x_0)}{\alpha}} \quad (1)$$

Donde  $R(x)$  es el cociente (tasa) de las cuentas, medido en la FEB respecto a la posición más cercana del SiPM  $x_0 = 8\text{ cm}$ ;  $x$  es la posición de la fuente de radiación sobre la barra con respecto a los SiPM en cm; y  $\alpha$  es la constante de atenuación (tabla IV).

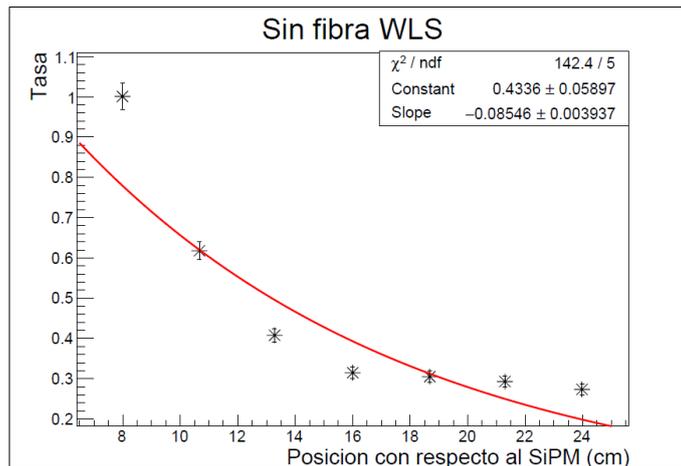
La tabla IV presenta los resultados obtenidos de los ajustes para el sistema de detección con y sin WLS. Los resultados del ajuste exponencial, en particular el valor  $\chi^2/ndf$ , favorecen el diseño del sistema de detección de partículas con WLS por tener un valor menor en comparación con el del otro sistema.

**TABLA II.** Datos obtenidos con el sistema de detección sin fibra WLS.

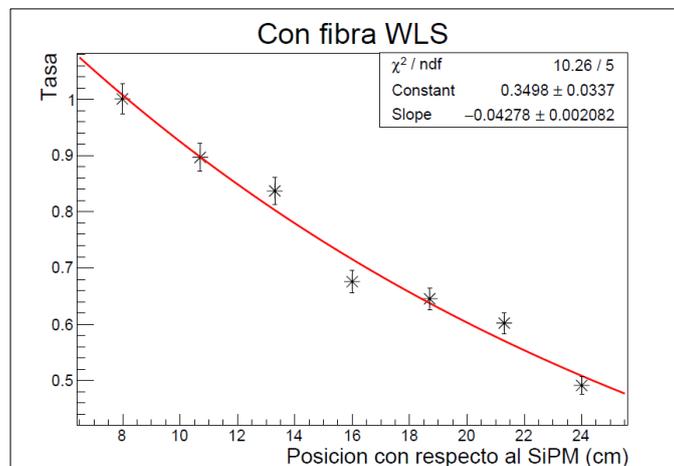
Posición respecto al SiPM (cm)	Tasa
8.0	1
10.7	0.616
13.3	0.407
16.0	0.314
18.7	0.305
21.3	0.292
24.0	0.273

**TABLA III.** Datos obtenidos con el sistema de detección con fibra WLS.

Posición respecto al SiPM (cm)	Tasa
8.0	1
10.7	0.897
13.3	0.837
16.0	0.676
18.7	0.645
21.3	0.602
24.0	0.491



**FIGURA 14.** Tasa del número de eventos en función de la distancia para el detector sin fibra WLS. En cada punto de la gráfica se pueden ver los errores estadísticos. La línea roja hace referencia a la función de ajuste utilizada.



**FIGURA 15.** Tasa del número de eventos en función de la distancia para el detector con fibra WLS. En cada punto de la gráfica se pueden ver los errores estadísticos. La línea roja hace referencia a la función de ajuste utilizada.

**TABLA IV.** Parámetros obtenidos mediante ajuste exponencial.

Detector	$\alpha = \frac{1}{slope}$	$\chi^2/ndf$
Sin WLS	11.70	142.4/5
Con WLS	23.41	10.39/5

## V. CONCLUSIONES

Los datos tomados con el sistema de detección sin fibra WLS al ser ajustados a una función de atenuación exponencial no presentan un resultado óptimo, como lo demuestra su alto valor de  $\chi^2/ndf$  (tabla IV).

En el caso del sistema de detección con fibra WLS se encontró un mejor ajuste a una función de atenuación exponencial de la luz. El sistema de detección con la fibra WLS es la mejor opción de diseño para registrar las interacciones de las partículas generadas con la fuente de radiación dentro del material centellador.

Este diseño de detección de partículas del detector con fibra WLS es ampliamente utilizado en experimentos de altas energías. Por ejemplo, en el laboratorio Fermilab, el sistema de registro y caracterización de rayos cósmicos del experimento MicroBooNE (Adams *et al.*, 2019), y en el sistema activo de detección de interacción de neutrinos del experimento MINERvA (Aliaga *et al.*, 2014).

Este artículo puede ser utilizado como guía para que estudiantes en facultades de ciencias básicas o instituciones educativas de enseñanza básica puedan construir sistemas de detección de partículas básicos con un bajo costo económico. Además, los estudiantes podrán analizar diferentes configuraciones de sistemas de detección de partículas si se introducen modificaciones en las siguientes variables:

- La longitud de la barra centelladora (50 cm, 1 m);
- Las dimensiones o cantidad de fotosensores conectados en la barra centelladora;
- La localización de los fotosensores en la barra centelladora (distribuir los fotosensores en la parte superior e inferior de la barra centelladora).

De esta manera, los estudiantes podrán validar y proponer nuevas ideas para diseñar futuros sistemas de detección de partículas.

## REFERENCIAS

Adams, C., Alrashed, M., An, R., Anthony, J., Asaadi, J., Ashkenazi, A., ... & Thomson, M. (2019). *Design and construction of the MicroBooNE Cosmic Ray Tagger system*. *Journal of instrumentation*, 14(04), P04004. doi: 10.1088/1748-0221/14/04/P04004

Aliaga, L., Bagby, L., Baldin, B., Baumbaugh, A., Bodek, A., Bradford, R., ... & Ziemer, B. P. (2014). *Design, calibration, and performance of the MINERvA detector*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 743, 130-159. doi: 10.1016/j.nima.2013.12.053

ELJEN Technology. (2021). *General Purpose EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212*. Recuperado de <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>

ELJEN Technology. (2021). *Optical Cement EJ-500*. Recuperado de <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-500>

ELJEN Technology. (2021). *Reflective Paint J-510*. Recuperado de <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-510>

Yang, H., Cao, D., Qian, Z., Zhu, X., Loh, C., Huang, A., ... & Qi, M. (2017). *Light attenuation length of high-quality linear alkyl benzene as liquid scintillator solvent for the JUNO experiment*. *Journal of Instrumentation*, 12(11), T11004. doi: 10.1088/1748-0221/12/11/T11004

Jordan, T., & Berns, H. G. (2010). *QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector User's Manual Series" 6000" DAQ*. Recuperado de [https://quarknet.org/sites/default/files/cf\\_6000crmdusermanual-small.pdf](https://quarknet.org/sites/default/files/cf_6000crmdusermanual-small.pdf)

Rodríguez Serrano, K. P., Maya Restrepo, M. A., & Jaén Posada, J. S. (2012). *Educación en Ingenierías: de las clases magistrales a la pedagogía del aprendizaje activo*. Ingeniería y Desarrollo, 30(1), 125-142. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-34612012000100008](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612012000100008)

Auger, M., Ereditato, A., Goeldi, D., Kreslo, I., Lorca, D., Luethi, M., ... & Weber, M. S. (2016). *Multi-channel front-end board for SiPM readout*. Journal of Instrumentation, 11(10), P10005. doi: 10.1088/1748-0221/11/10/P10005

Saint-Gobain Crystals. (2017-2021). *Plastic Scintillating Fiber*. Recuperado de <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/fiber-product-sheet.pdf>

SensL. (2014). *C-Series Low Noise, Blue-Sensitive Silicon Photomultipliers*. Datasheet. Recuperado de <https://www.mouser.com/datasheet/2/308/DS-MicroCseries-1489568.pdf>

SensL. (2018). *Introduction to SiPM Technical note*. Recuperado de [https://elearning.unimib.it/pluginfile.php/521118/mod\\_folder/content/0/SiPM.pdf](https://elearning.unimib.it/pluginfile.php/521118/mod_folder/content/0/SiPM.pdf)

Spectrum Techniques. (2016). *Cs-137/Ba-137m Isotope Generator Manual*. Recuperado de <https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/198344>

T. Rada Crespo, O. Hernández, D. Rueda-Delgado, H. Robles, and J. C. Miranda. (2022). *Percepción del aprendizaje de la Física en diferentes programas de ingeniería*. Revista Mexicana de Física E190202021–9. Recuperado de <https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf-e/article/view/5866/6313>

Skulski, W., Ruben, A., & BenZvi, S. (2017). *FemtoDAQ: A low-cost digitizer for SiPM-based detector studies and its application to the HAWC detector upgrade*. IEEE Transactions on Nuclear Science, 64(7), 1677-1682. doi: 10.1109/TNS.2017.2660442