
Implementación de un sistema de detección de centelleo para el estudio de trayectorias de partículas cargadas

Autor:

JULIÁN ANDRÉS DÍAZ QUINTERO
jadiazq@eafit.edu.co

Tutor:

PhD. Alex Marcelo Tapia Casanova
Escuela de Ciencias Básicas
Universidad de Medellín
atapia@udemedellin.edu.co

Cotutor:

PhD. Jorge León David Caro
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería
Universidad EAFIT
jdavidca@eafit.edu.co

Universidad EAFIT
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería
Medellín, Colombia
Julio, 2025

Índice

1. Planteamiento del problema	3
2. Antecedentes	3
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo general	4
3.2. Objetivos específicos	4
4. Justificación	4
5. Metodología	5
5.1. Etapa I: Diseño y caracterización del detector	5
5.2. Etapa II: Construcción del detector	5
5.3. Etapa III: Pruebas experimentales y caracterización del detector	6
5.4. Etapa IV: Reconstrucción de las trayectorias de los electrones incidentes	6
5.5. Etapa V: Documentación y presentación de resultados	6
6. Cronograma	6
7. Alcance	6
8. Presupuesto	7
9. Propiedad intelectual	7

Índice de cuadros

1	Cronograma	6
2	Tabla de costos del proyecto.	7

1. Planteamiento del problema

La detección de partículas cargadas mediante centelleadores plásticos es una técnica ampliamente utilizada en física de altas energías debido a su versatilidad y bajo costo. Estos detectores han mostrado su capacidad en grandes experimentos de física de partículas, como los realizados en el CERN y en el Fermilab, donde se utilizan para la caracterización de partículas con altas energías provenientes de colisiones [1], [2]. Su principio de funcionamiento se basa en convertir la energía depositada por partículas incidentes, tales como electrones o muones, en señales ópticas que pueden ser registradas mediante sensores como los tradicionales fotomultiplicadores (PMT) o los más avanzados fotodetectores de silicio (SiPM) [3].

esta afirmacion requeriria referencias
teniendo diferentes principios de operación se vale decir que uno es más avanzado que el otro? .. o tal vez, que estos últimos son más apropiados para algo?

No obstante, en el ámbito de la física experimental, persisten desafíos importantes relacionados con la reconstrucción de trayectorias de este tipo de partículas, ya que este proceso requiere no solo una detección eficiente, sino también una medición precisa del tiempo de llegada de los fotones generados por el centelleo, dado que dicho parámetro es clave para inferir la dirección de paso de las partículas [4]. En los últimos años, el desarrollo de tecnologías como los sistemas de cronometraje de alta resolución y los SiPMs ha abierto nuevas posibilidades para implementar configuraciones más simples y accesibles, como barras centelladoras acopladas a estos dispositivos [5], [6]; Lo cual permite explorar soluciones experimentales prácticas y de bajo costo.

¿cuales?
no se ha explicado que son las barras centelleadoras

¿que tan bajo costo respecto a los anteriores?

Por lo tanto, este proyecto propone la construcción de un detector compuesto por dos barras centelladoras acopladas a SiPMs, específicamente diseñado para la reconstrucción de trayectorias de partículas cargadas provenientes de una fuente puntual. El objetivo principal es evaluar la precisión y confiabilidad de esta configuración en experimentos de altas energías, respondiendo a la pregunta de investigación: ¿Qué tan precisa y confiable puede ser una configuración de barras centelladoras para la reconstrucción de trayectorias de partículas cargadas en experimentos de altas energías?

¿que tipo de fuente?

en el planteamiento del problema, se debe describir el problema a resolver, no el objetivo del proyecto.

A partir de los objetivos, sugiero reconsiderar la pregunta de investigación. P. ej. ¿cuáles son las variables que determinan la precision de un sensor de particulas cargadas que utiliza la configuración de dos barras centelleadoras acopladas a sensores SiPM?

2. Antecedentes

Diversos autores han desarrollado sistemas experimentales para la detección y estudio de partículas cargadas de altas energías, enfocándose principalmente en configuraciones de centelleo con coincidencia temporal [7]-[12]. Por ejemplo, el proyecto CosmicWatch propuso un sistema portátil y de bajo costo basado en centelleadores plásticos acoplados a SiPMs y una placa Arduino Nano, permitiendo mediciones confiables del flujo de partículas y experimentos de coincidencia entre múltiples módulos [7].

¿cuales?

Otra iniciativa destacada es el proyecto Escaramujo, implementado en diversos países, que emplea módulos NIM, tubos fotomultiplicadores (PMT) y tarjetas de coincidencia lógica. Esta configuración permite estudios de coincidencia, tiempo de vuelo y distribución angular de partículas cargadas [8].

En el ámbito universitario, instituciones como la UNAM y la PUCP han desarrollado prác-

tivas experimentales centradas en el estudio angular de partículas cósmicas, utilizando arreglos rotatorios de dos o más barras centelladoras acopladas a sistemas de coincidencia. Estos experimentos han demostrado concordancia con la ley angular $\cos^2 \theta$ [9]. De manera similar, Yi-Hong Kuo diseñó un sistema giratorio de dos detectores en coincidencia, obteniendo resultados consistentes con modelos teóricos [10].

En experimentos de mayor complejidad, como MINERvA del Fermilab, se ha empleado una matriz tridimensional de centelladores para reconstruir trayectorias mediante coincidencias múltiples entre capas. Aunque estos arreglos requieren infraestructura robusta, han servido como referencia para diseños más simples orientados a contextos educativos o de bajo presupuesto [11].

Finalmente, desarrollos recientes en cronometraje de alta resolución han demostrado que es posible alcanzar precisiones subnanosegundo en la medición del tiempo de arribo de fotones, incluso con geometrías de detección compactas. Estos avances, apoyados en sistemas TDC y SiPM modernos, han ampliado las posibilidades de reconstrucción angular en sistemas accesibles [13].

Dada la relevancia, los antecedentes deberían incluir los años de los desarrollos

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de una configuración experimental basada en dos barras centelladoras acopladas a sensores SiPM, destinada a la reconstrucción de trayectorias de partículas cargadas.

No es claro si el objetivo es experimental (evaluar el desempeño de ..) o semiempírico (reconstruir las trayectorias a partir de las mediciones).

SUGERENCIA: Desarrollar un sensor de partículas (nombre concreto) utilizando la config. de dos barras centelladoras acopladas a sensores SiPM para su uso en la reconstrucción de trayectorias de estas partículas.

3.2. Objetivos específicos

- Construir una configuración experimental basada en un **diseño previamente establecido** ^{¿por quien? ¿donde? ¿cuando?} para el estudio de partículas cargadas, utilizando dos barras centelladoras acopladas a sensores SiPM.
- Caracterizar experimentalmente el sistema construido utilizando una fuente de partículas cargadas, ^{¿se debería definir el tipo de partículas?} evaluando su eficiencia y capacidad para la discriminación de coincidencias. ^{*En el texto no se ha definido que son las coincidencias en el contexto del trabajo propuesto}
- Analizar los tiempos de arribo de los fotones al detector utilizando el sistema experimental, comparando los resultados con datos teóricos y experimentales previos.
- Determinar las limitaciones y alcances del sistema experimental en términos de resolución temporal y reconstrucción de trayectorias.

4. Justificación

La detección de electrones de altas energías es esencial para el estudio de fenómenos fundamentales en física de partículas y astrofísica, como la radiación cósmica y las inter-

acciones en aceleradores [14]. Estos electrones no solo son clave para entender procesos como las cascadas atmosféricas de rayos cósmicos, sino que también tienen aplicaciones prácticas en campos como la medicina, la tecnología y la investigación ambiental. Por ejemplo, la radioterapia de electrones de alta energía se utiliza en tratamientos oncológicos, aprovechando su capacidad para depositar energía de manera precisa en tejidos biológicos [15]. En astrofísica, el análisis de electrones cósmicos proporciona información crucial sobre fuentes de alta energía, como supernovas y agujeros negros [16], mientras que en tecnología, estos estudios son fundamentales para el desarrollo de sistemas de detección más avanzados.

En este contexto, los detectores de centelleo desempeñan un papel fundamental, ya que permiten registrar con precisión partículas cargadas de alta energía, contribuyendo a la reconstrucción de trayectorias y al análisis de eventos físicos relevantes. Estudiar su respuesta experimental es esencial para comprender su funcionamiento, evaluar su eficiencia y validar su uso en diversas configuraciones experimentales. en los antecedentes se confirma que ya se ha hecho, porque es importante hacerlo en este trabajo?

Desde la perspectiva de la ingeniería física, este proyecto combina diseño experimental y análisis de datos para abordar los retos asociados con la detección de electrones de altas energías. Al integrar ¿de qué rama de las ciencias? **conceptos teóricos** con aplicaciones prácticas, se busca perfeccionar parámetros experimentales que permitan avanzar hacia detectores más eficientes y confiables.

5. Metodología

El presente trabajo se desarrollará
~~La presente investigación se desarrolla~~ siguiendo una metodología en cascada ~~cadena~~, estructurada en cinco etapas secuenciales: diseño, construcción, caracterización experimental, análisis de datos y documentación. Este enfoque permite que cada fase del proyecto aliamente y condicione a la siguiente, garantizando coherencia y trazabilidad técnica a lo largo del proceso. en caso de requerirse mas espacio, se puede prescindir de esta frase

5.1. Etapa I: Diseño y caracterización del detector

Se diseñará la geometría del sistema de detección mediante simulaciones y se caracterizarán componentes clave, como centelleadores y SiPMs, para garantizar que cumplan con las especificaciones técnicas necesarias. ¿este trabajo fue el realizado en P Avanzado 2?. Se debe aclarar

5.2. Etapa II: Construcción del detector

El detector será construido siguiendo las especificaciones definidas en el diseño. Esta etapa incluye el ensamblaje de los componentes físicos, **la integración de la electrónica necesaria para el registro de señales** y la realización de pruebas preliminares para verificar su funcionamiento. ¿qué implica esta integración?

5.3. Etapa III: Pruebas experimentales y caracterización del detector

Se llevarán a cabo experimentos **controlados** ^{¿qué tipo de controles?} para evaluar el desempeño del detector en condiciones reales. Esto incluye la medición de la respuesta del sistema ante electrones incidentes, la capacidad temporal y espacial del sistema, y su idoneidad para el análisis posterior de trayectorias.

5.4. Etapa IV: Reconstrucción de las trayectorias de los electrones incidentes

Los datos obtenidos durante las pruebas experimentales serán procesados para estimar las trayectorias de los electrones incidentes **mediante técnicas de reconstrucción** ^{se deben especificar las técnicas}. Para ello, se desarrollarán y validarán algoritmos específicos, tomando como referencia simulaciones que permitan evaluar la precisión de los resultados.

5.5. Etapa V: Documentación y presentación de resultados

Finalmente, se elaborará un informe técnico detallado que contendrá la descripción del diseño y construcción del detector, los resultados de las pruebas experimentales, un análisis de la reconstrucción de trayectorias y las conclusiones del proyecto.

6. Cronograma ^{si el trabajo implica todas las fases, no es apto para 15 semanas. El alcance incluye etapas previas al trabajo.}

El cronograma se muestra en la la tabla 2.

Etapa	%	Semanas														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Revisión Bibliográfica	30	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Diseño y Caracterización	100	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Construcción del Detector	20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pruebas Experimentales	0	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Reconstrucción de Trayectorias	0	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Informe Final	0	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Cuadro 1: Cronograma

7. Alcance

Se realizará el **diseño** ^{de acuerdo con el cronograma ya fue realizado, previo a este proyecto}, construcción y caracterización de un sistema de detección basado en centelleadores, utilizando los materiales disponibles como referencia [17]. El detector será construido siguiendo las especificaciones técnicas de los materiales seleccionados y estará

diseñado específicamente para permitir el análisis de los datos recolectados y la estimación de trayectorias. Además, se realizarán pruebas experimentales para verificar su funcionamiento y validar su capacidad para registrar datos necesarios para esta reconstrucción.

Los productos esperados incluyen un sistema físico de detección acompañado de un informe técnico que describirá los materiales utilizados, el diseño implementado, los resultados obtenidos en la caracterización experimental y la información sobre la reconstrucción de trayectorias.

8. Presupuesto

Los recursos requeridos para la realización del proyecto se presentan en la Tabla 2. Cabe aclarar que los materiales allí mencionados ya se encuentran disponibles para los autores, por lo que no se requiere su adquisición adicional. **La fuente de partículas cargadas se incluye de no usarse cómo se cumplirá el objetivo de evaluación? considerando su posible uso experimental,** dependiendo de su disponibilidad y la normativa.

Tipo de servicio	Recursos	Unidades	V.Unitario (COP\$)	V total (COP\$)	Proveedor
Personal	Hora tutor	50	100.000	5'000.000	UDM
	Hora de estudiante	90	20.000	1'800.000	Estudiante
Infraestructura	Tiempo de cómputo	36	20.000	720.000	EAFIT
Servicios usados	Internet	4	200.000	800.000	EAFIT
Equipamiento	SiPM (30020-SMT-TR1)	2	200.000	400.000	ON Semiconductor [18]
Equipamiento	Barra(BC-408)	2	300.000	600.000	Eljen Technology [19]
Equipamiento	Fuente Sr-90	1	4'500.000	4'500.000	QSA Global [20]
Equipamiento	Fibra óptica	2	100.000	200.000	Thorlabs [21]
Total				14'020.000	

Cuadro 2: Tabla de costos del proyecto.

9. Propiedad intelectual

La Universidad EAFIT ostenta los derechos de propiedad intelectual y de explotación derivados de este proyecto, en concordancia con su rol institucional en el proceso de investigación. Esta iniciativa se desarrolla en colaboración con la Universidad de Medellín y cuenta con el respaldo de la Institución Universitaria ITM, lo que resalta su carácter interinstitucional. Por otro lado, los derechos morales, que son inalienables e irrenunciables, pertenecen al autor principal y a los tutores académicos que han contribuido directamente a la elaboración del presente trabajo, conforme a lo establecido en el reglamento institucional de EAFIT.[22]

Referencias se debe corregir el estilo al solicitado IEE

- [1] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] A. Collaboration et al., "Expected performance of the ATLAS experiment-detector, trigger and physics," SLAC National Accelerator Laboratory (United States), inf. téc., 2008.
- [3] E. Garutti, "Silicon photomultipliers for high energy physics detectors," *Journal of Instrumentation*, vol. 6, n.º 10, pág. C10003, 2011.
- [4] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*. Springer, 1994. DOI: [10.1007/978-3-642-57920-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2).
- [5] D. Renker y E. Lorenz, "Advances in solid state photon detectors," *Journal of Instrumentation*, vol. 4, n.º 04, P04004, 2009. DOI: [10.1088/1748-0221/4/04/P04004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/04/P04004).
- [6] A. N. Otte, T. Nguyen, A. Purushothaman et al., "Characterization of three high efficiency and blue sensitive silicon photomultipliers," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 846, págs. 106-125, 2017. DOI: [10.1016/j.nima.2016.12.030](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.12.030).
- [7] S. N. Axani, K. Frankiewicz y J. M. Conrad, "The CosmicWatch Desktop Muon Detector: a self-contained, pocket sized particle detector," *Journal of Instrumentation*, vol. 13, n.º 03, P03019, 2018.
- [8] E. Project, *Proyecto Escaramujo*, 2020. dirección: <http://escaramujo.net>.
- [9] U. Grupo de Instrumentación Física, "Experimento de distribución angular de muones cósmicos," *Revista Mexicana de Física*, vol. 65, n.º 1, págs. 123-128, 2021.
- [10] Y.-H. Kuo y C.-C. Yang, "Study of the zenith angle dependence of cosmic-ray muons at sea level," *Chinese Journal of Physics*, vol. 48, n.º 6, págs. 890-897, 2010.
- [11] L. Aliaga et al., "The MINERvA detector," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 743, págs. 130-159, 2014.
- [12] J. Wu, H. Shi y Z. Hu, "Development of a high-resolution time-to-digital converter (TDC) in FPGA," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, n.º 3, págs. 1636-1640, 2008.
- [13] T. Poikela, V. Zivkovic, M. Campbell y et al., "Timepix4: High-resolution time and energy measurement readout chip for particle imaging detectors," *Journal of Instrumentation*, vol. 16, n.º 01, pág. C01016, 2021. DOI: [10.1088/1748-0221/16/01/C01016](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/C01016).
- [14] P. D. Group, "Review of Particle Physics," *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2020, n.º 8, pág. 083C01, 2020. DOI: [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).
- [15] K. R. Hogstrom y P. R. Almond, "Review of electron beam therapy physics," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 51, n.º 13, R455, 2006.
- [16] T. K. Gaisser, R. Engel y E. Resconi, *Cosmic Rays and Particle Physics*, 2nd. Cambridge University Press, 2016, ISBN: 9781107043201.

- [17] P. Patiño-Gallego, R. Benavides, A. Tapia y D. Martinez-Caicedo, “Simulación de un sistema básico de detección de muones usando software libre,” *Revista Mexicana de Física E*, vol. 22, pág. 010 206, ene. de 2025, Received 26 June 2023; accepted 3 April 2024.
- [18] ON Semiconductor, *Silicon Photomultipliers (SiPM) - MicroFC-30020-SMT-TR1*, <https://www.onsemi.com/products/sensors/image-sensors-and-si-photodiodes/sipm>, Consultado en julio de 2025.
- [19] Eljen Technology, *BC-408 Plastic Scintillator*, <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/bc408>, Consultado en julio de 2025.
- [20] QSA Global, *Radiation Sources - Strontium-90*, <https://www.qsa-global.com/>, Consulta directa requerida, julio de 2025.
- [21] Thorlabs Inc., *Optical Fiber Components*, <https://www.thorlabs.com/>, Consultado en julio de 2025.
- [22] Ene. de 2018. dirección: <https://www.eafit.edu.co/institucional/reglamentos/Documents/reglamento-propiedad-intelectual-enero-2018-1.pdf>.