

Simulación de un sistema básico de detección de muones usando software libre

P. Patiño-Gallego and R. Benavides

*Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano,
Calle 73 N° 76 A-354, Vía el Volador, Medellín Colombia.*

A. Tapia

*Universidad de Medellín,
Carrera 87 N° 30 - 65, Medellín, Colombia,
e-mail: atapia@udemedellin.edu.co*

D. Martínez-Caicedo

*South Dakota School of Mines and Technology,
501 E St Joseph St, Rapid City, SD 57701, Estados Unidos.*

Received 26 June 2023; accepted 3 April 2024

Los detectores de partículas construidos con barras centelladoras plásticas se han utilizado en aplicaciones de física de altas energías por mucho tiempo, ya que poseen una respuesta rápida a la producción de fotones, son fáciles de fabricar y son de bajo costo. Se utilizan generalmente con sensores de luz, como los foto-multiplicadores de silicio (SiPM), los cuales se han utilizado en los últimos años por su alta eficiencia y su bajo voltaje de operación, entre otras ventajas. Generalmente, los SiPM se encuentran en un extremo de la barra para coleccionar la luz y de esta manera crear una señal electrónica de salida. El objetivo de este trabajo es simular el proceso de recolección de luz, partiendo desde el momento cuando los fotones ópticos son producidos por el flujo de muones atravesando una barra centelladora, su viaje a través de una fibra óptica de corrimiento de longitud de onda, hasta su detección por parte del SiPM. Esta simulación implementada en un software libre y de código abierto como lo es GEANT4 puede servir como una guía importante para estudiantes de habla hispana que estén interesados en aprender la física de detectores de partículas elementales.

Descriptores: Muones; barra centelladora; fibra WLS; SiPM; GEANT4.

Particle detectors built with plastic scintillator bars have been used in high-energy physics applications for a long time because they have a fast response to photon production, are easy to fabricate, and are inexpensive. They are generally used with light sensors, such as silicon photo-multiplier (SiPM), which have been used in recent years for their high efficiency and low operating voltage, among other advantages. SiPMs are usually located at the end of the bar to collect the light and thus create an electronic output signal. The objective of this work is to simulate the light collection process, starting from when optical photons are produced by a flow of muons passing through a scintillator bar, their journey through a wavelength-shifted optical fiber, up to their detection by the SiPM. This simulation implemented in free and open source software such as GEANT4 can serve as an important guide for Spanish speaking students who are interested in learning the physics of elementary particle detectors.

Keywords: Muons; scintillator bar; WLS fiber; SiPM; GEANT4.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.22.010206>

1. Introducción

La educación actual presenta una transformación en cuanto a la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias, donde se da gran importancia a las tecnologías digitales para un mayor acceso a los conocimientos científicos que se desean alcanzar y como herramienta didáctica que facilite la comprensión de los contenidos a ser enseñados en el aula de clase. Las tecnologías digitales son una herramienta que ha comenzado a ser importante en la educación a causa de su versatilidad para la enseñanza de cualquier disciplina académica, implementándose no sólo en los estándares básicos de competencias para la educación básica y media, sino también para la educación superior [1].

Una ventaja de las nuevas tecnologías es que no solamente están transformando a profundidad el significado de la educación, sino que son las mejores herramientas para adaptarse a los cambios. Esto se puede evidenciar en la implementación de tecnologías digitales como programas de cómputo y aplicaciones virtuales para la simulación de dispositivos físicos y su posterior explicación a partir de la modelación física, evitando que se complejice el aprendizaje por la inadecuada enseñanza de los conceptos físicos por parte de los profesores encargados del área, por lo cual se ha facilitado la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias en el aula de clases [1].

La física experimental de altas energías y la física nuclear, por muchas décadas han utilizado detectores de partículas basados en centelladores plásticos, debido a su facilidad de fabricación, alta eficiencia para interactuar con partículas car-

gadas, costos moderados y rapidez en tiempo de respuesta. Usualmente estos centelladores plásticos en forma de barras son utilizados con una fibra óptica de corrimiento de longitud de onda (WLS, por sus siglas en inglés Wavelength Shift) [2], normalmente está incrustada dentro de la barra centelladora, para evitar la auto-absorción de fotones. La barra va acoplada a un sensor de luz como los tubos foto-multiplicadores (PMT, por sus siglas en inglés Photo-multiplier Tube) [3] ó los foto-multiplicadores de silicio (SiPM, por sus siglas en inglés Silicon Photo-multiplier) [4,5] cuya función principal es coleccionar la luz generada por el centelleo dentro la barra. Con este diseño se han construido detectores para grandes experimentos como el Observatorio Pierre Auger [6], MINOS [7], OPERA [8], entre otros. Siendo utilizados como detectores de muones subterráneos [9] y detectores de haz de neutrinos generados por aceleradores de partículas [10].

Los detectores de centelleo utilizan materiales que al ser expuestos a radiación ionizante sus átomos se excitan y luego emiten un destello de luz cuando vuelven a su estado inicial, esta luz tiene una longitud de onda que está dentro del rango visible, este fenómeno es conocido como centelleo [11]. La emisión de esta luz o centelleo se da por medio de dos procesos: fluorescencia y fosforescencia; el primero es un proceso instantáneo, del orden de los 10 ns después de la interacción. El segundo es el proceso retardado, del orden de minutos u horas, dependiendo del material [12]. En muchas ocasiones el centelleo producido por la radiación no se puede recolectar fácilmente, en este caso se hace un revestimiento de la barra centelladora con un material muy reflectante como el dióxido de Titanio (TiO_2) y se incrusta una fibra óptica WLS dentro de la barra, para poder transportar la luz desde donde se produce hasta donde se encuentre el sensor SiPM.

El SiPM es un foto-multiplicador de estado sólido altamente sensible y eficiente basado en el silicio, es similar en principio a un PMT, pero en lugar de utilizar un foto-cátodo y una serie de dinodos para amplificar la señal, utiliza una matriz de píxeles sensibles a la luz llamados micro-canales. Estos micro-canales son foto-diodos de avalancha (APD, del inglés Avalanche Photodiode), operando en modo Geiger; cada micro-canal genera un pulso de salida por cada fotón de luz detectado, la suma de las señales producidas en todos los micro-canales conectados en paralelo es la señal del SiPM, la cuál es una señal de amplitud proporcional al número de fotones detectados [5].

El objetivo de este trabajo es mostrar de manera didáctica la implementación y simulación de la interacción de cierto tipo de radiación con un detector construido con una barra centelladora plástica, la cuál tiene incrustada en su centro una fibra óptica WLS que transporta los fotones ópticos producidos por la radiación hasta un extremo de la barra donde se ubica un foto-multiplicador de tipo SiPM, el cuál colecciona estos fotones y nos permite conocer su energía depositada. Para esto, inicialmente se implementa el diseño del detector en la herramienta computacional GEANT4 (del inglés Geometry And Tracking 4) [13], luego se define un flujo de muones como el tipo de radiación, su rango de energía, la distribución

aleatoria de los puntos de impacto en la barra y se simula la interacción de este flujo con la barra centelladora teniendo en cuenta todas las propiedades ópticas (refracción y absorción) de los materiales de la barra, del envolvente y la fibra óptica WLS. Además, la barra centelladora y el SiPM se definen como volúmenes sensibles para la detección de los fotones ópticos producidos en la interacción, y así recolectar los datos de interés para finalmente realizar el respectivo análisis de la física involucrada.

Se cree que el uso de metodologías activas, tales como el diseño, simulación y construcción de montajes o artefactos que impliquen principios físicos, ha resultado muy exitoso en la formación de ingenieros [14] y también en el proceso de la enseñanza de la física. Es por eso, que esta simulación puede servir como una guía práctica importante para los estudiantes de habla hispana que pretendan estudiar e implementar en GEANT4 el diseño de detectores de partículas basados en centelladores plásticos.

2. Configuración de la simulación

Para iniciar con todo el proceso de simulación se empieza eligiendo el diseño del detector e implementándolo en GEANT4. GEANT4 es un conjunto de herramientas de simulación desarrollado por el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) y colaboradores de todo el mundo. GEANT4 permite simular la interacción de partículas subatómicas con una variedad de materiales y geometrías utilizando el método Monte Carlo. Estas simulaciones pueden utilizarse para predecir y analizar el comportamiento de partículas en experimentos físicos y en la detección de radiación, así como para optimizar el diseño de detectores, aceleradores y otras herramientas [13,15]. GEANT4 es un software libre y de código abierto, lo que significa que los usuarios pueden descargar, modificar y distribuir el software sin costo alguno. La combinación de versatilidad, precisión, colaboración internacional, código abierto, documentación extensa y una comunidad activa ha contribuido al éxito y la popularidad de GEANT4 como una de las principales herramientas en la física de partículas, la astrofísica, la medicina nuclear y otras áreas relacionadas [16]. GEANT4 ha sido construido usando la programación orientada a objetos mediante el lenguaje C++, contiene una gran cantidad de clases, cada una de ellas cumpliendo una función muy específica dentro de la simulación. Por ejemplo, con cada una de ellas se pueden definir objetos con características como: la geometría del detector, la generación de partículas, los procesos físicos, la definición de volúmenes sensibles, etc. A continuación se describe cada una de las anteriores características mencionadas que definen nuestra simulación.

2.1. Geometría

Parte importante en la simulación, es construir los volúmenes geométricos que serán utilizados; cada volumen representa un objeto, con su forma y sus características físicas, excepto

el mayor volumen posible, llamado *mundo*, el cuál puede ser entendido como el laboratorio virtual donde se realiza el experimento. Por lo tanto, se inicia creando el volumen *mundo* que es donde se alberga al resto de los volúmenes del sistema de detección: la barra centelladora, la fibra óptica WLS y el foto-sensor SiPM. Adicionalmente se crean los materiales que utiliza cada uno de los volúmenes y también se asignan las superficies ópticas de cada volumen, esto con el fin generar los procesos ópticos correspondientes.

Las siguientes son las características de los respectivos volúmenes que conforman el detector: una barra centelladora con dimensiones de $24 \times 1 \times 4$ cm, cuyo material es el poliviniltolueno; la barra tiene un revestimiento reflectante de 0.012 cm de grosor de TiO_2 . A la barra se le realiza una extracción de volumen para obtener un agujero por donde irá la fibra óptica WLS. GEANT4 posee las herramientas necesarias para esta extracción, para este caso se utiliza la clase `G4SubtractionSolid`. La barra centelladora junto con el revestimiento y la extracción del volumen se muestra en la Fig. 1a). La fibra óptica WLS se diseña con su respectivo núcleo y un doble revestimiento. El núcleo tiene un radio de 0.2 mm, el primer revestimiento un grosor de 0.15 mm y el segundo de 0.15 mm. Los respectivos materiales usados en cada uno de ellos son: Poliestireno, Polimetilmetacrilato (PMMA) y polímero de flúor, ver Fig. 1b). El SiPM se diseña como un ortoedro de silicio con dimensiones de $1 \times 1 \times 0.25$ mm correspondientes al SiPM de referencia MicroFC-10010-SMT-TR1 [17], ver Fig. 1c). La simulación detallada del SiPM es un problema complejo que va más allá del objetivo de este trabajo, por eso únicamente se considera al SiPM como un bloque de silicio. En la Fig. 1d) se puede ver todo el conjunto de volúmenes ubicados en sus respectivos lugares.

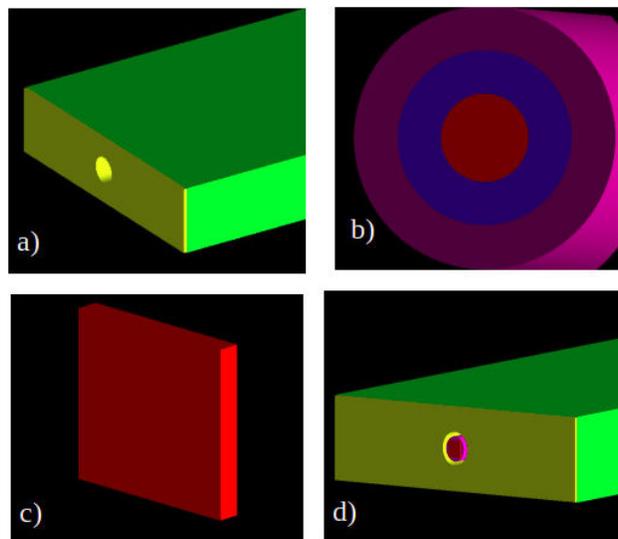


FIGURA 1. a) Extracción del volumen. La barra centelladora esta en color amarillo y el revestimiento en color verde. b) WLS, núcleo en rojo, revestimiento 1 en púrpura oscuro, revestimiento 2 en azul. c) SiPM d) Ubicación de la fibra WLS en púrpura y SiPM en rojo.

2.2. Materiales y sus propiedades

Es necesario proporcionar información acerca de los materiales para cada uno de los volúmenes del sistema de detección, para esto se accede a la base de datos de GEANT4 que cuenta con una biblioteca de elementos, isótopos y materiales predeterminados; sin embargo en algunos casos el usuario puede definir nuevos materiales a través de las clases `G4Isotope`, `G4Element` y `G4Materials` especificando algunas características como: densidad, masa molar y número atómico.

Para esta simulación se define cada uno de los materiales que contienen los volúmenes del sistema de detección, y para los procesos ópticos requeridos es necesario añadirle a cada uno de ellos sus propiedades ópticas; las cuales se almacenan en una tabla de propiedades que se vincula al material, en las Tablas I y II se pueden ver estas propiedades vinculadas a la barra centelladora y a la fibra WLS, respectivamente. Estas propiedades pueden ser independientes de la energía o pueden expresarse en función de la energía del fotón, para esta simulación se utiliza la energía del fotón.

Para la barra se adicionan propiedades de un centellador plástico de referencia BC-408 proporcionadas por el fabricante [18], estas propiedades son: índice de refracción, rendimiento lumínico por unidad de energía, longitud de atenuación, tiempo de decaimiento rápido y lento (ver Tabla I).

TABLA I. Propiedades de la barra centelladora BC-408 utilizado en esta simulación.

Barra centelladora	
Índice de refracción	1.58
Rendimiento	11,136 fotones/MeV
Longitud de atenuación	210 cm
Pico de emisión	425 nm
Tiempo de decaimiento rápido	2.1 ns
Tiempo de decaimiento lento	14.2 ns
Salida de luz	64

TABLA II. Propiedades de la fibra WLS utilizada en esta simulación.

Fibra óptica WLS	
Núcleo	
Densidad	1.05 g/cm ³
Tiempo de decaimiento	2.7 ns
Longitud de atenuación	350 cm
Índice de refracción	1.60
Revestimiento 1	
Índice de refracción	1.49
Revestimiento 2	
Índice de refracción	1.42

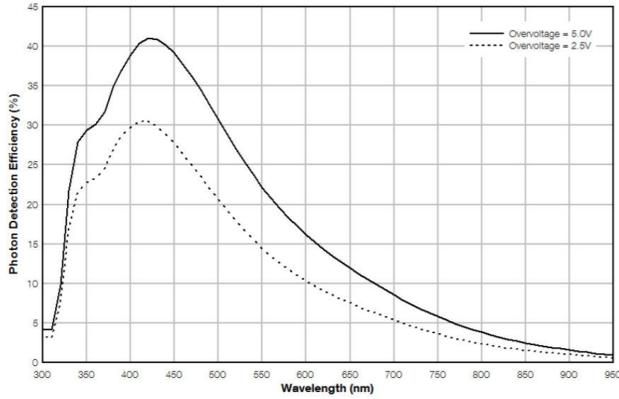


FIGURA 2. Gráfica del espectro de emisión del SiPM MicroFC-30035-SMT. Figura tomada de [17].

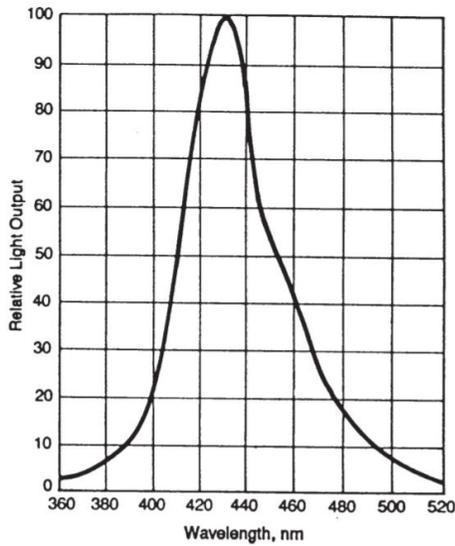


FIGURA 3. Pico de la longitud de onda de emisión de la barra centelladora BC-408. Figura tomada de [18].

Para la fibra óptica WLS se adicionan propiedades de la referencia BCF-92 proporcionadas por el fabricante: el índice de refracción tanto para el núcleo como para los revestimientos y la longitud de atenuación, tal y como se muestra en la Tabla II.

Finalmente, para el SiPM no se añade ninguna propiedad, únicamente construimos la geometría con material de silicio y la declaramos como volumen sensible, esto último se explicará en la Sec. 2.5. Para sus dimensiones tomamos como referencia el SiPM MicroFC-30035-SMT, el cuál tiene el pico de máxima eficiencia de foto-detección en un valor de longitud de onda igual a 425 nm, como se muestra en la Fig. 2. En la simulación esto último no se tiene en cuenta, pero es muy importante si en algún momento se realiza el montaje experimental ya que este valor de la longitud de onda debe coincidir con el pico de emisión de la barra centelladora para evitar una reducción en la eficiencia de detección del SiPM; para la referencia BC-408 este valor está en 425 nm tal como muestra en la Fig. 3.

2.3. Propiedades de las superficies

Para obtener una simulación más realista, se pueden utilizar las propiedades ópticas de las superficies, que son determinadas a partir de los índices de refracción de los dos materiales que forman la superficie, estos índices ya han sido incluidos en la tabla de propiedades anteriormente descrita. Hay dos tipos de superficies: la superficie de borde y la superficie de piel, la primera delimita el límite entre dos volúmenes y el orden en el que se necesiten, y la segunda es la que rodea un solo componente del sistema de detección. GEANT4 proporciona diferentes configuraciones para definir estas propiedades según sea la necesidad.

Para que haya una buena captación de fotones ópticos es esencial simular correctamente la calidad de la superficie del centellador y su revestimiento, así como también, de los materiales reflectantes utilizados. Debido a que el recubrimiento de nuestra barra es de TiO_2 elegimos el tipo de superficie dieléctrico-dieléctrico, de esta manera los fotones se pueden transmitir (rayo transmitido) o reflejar (rayo reflejado). En los casos en los que el fotón solo puede reflejarse, se produce una reflexión interna total. Para esto hay varias superficies de acabado, entre ellas elegimos la pulida, ya que aplica la ley de Snell basada en los índices de refracción, pero antes de esto usa la reflectividad para determinar si se absorbe un fotón. Específicamente, la reflectividad utilizada aquí no es el coeficiente de reflexión sino la resta de 1 menos el coeficiente de absorción [19].

2.4. Definición de partículas primarias

Definir la fuente de partículas primarias dentro de una simulación tiene gran relevancia, debido a que se debe definir el número de partículas y sus propiedades tales como: tipo de partícula, posición inicial, energía cinética inicial o momento lineal, y dirección del momento. La generación de partículas primarias fue definida a partir de la clase `G4ParticleGun`, esta clase permite disparar partículas con las propiedades antes mencionadas. Para nuestro caso, en la Fig. 4 se muestra que las disparamos desde una posición fija de 6 cm (sobre

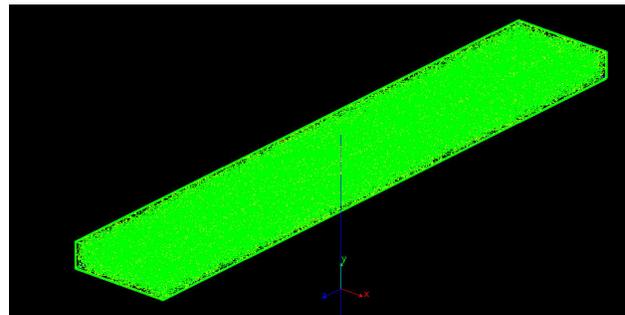


FIGURA 4. Interacción de 1 muón (línea vertical en azul) con energía de 4 GeV. Las trayectorias verdes son los fotones ópticos en el interior de la barra centelladora. También se aprecia el sistema de coordenadas x, y, z .

el eje y) respecto a la barra centelladora, pero con una distribución aleatoria y uniforme dentro de un plano (x, z) de 1 cm de lado, con una dirección perpendicular a la barra y con un momento lineal determinado. GEANT4 proporciona más de 100 tipos de partículas por defecto, para este trabajo las partículas emitidas son muones con un rango de energía entre 2 y 6 GeV, se escogen estas características ya que los muones son las partículas cargadas atmosféricas más numerosas al nivel del mar, y su energía media está alrededor de 4 GeV [20]. Para visualizar un flujo de 1000 muones se necesita gran poder de cómputo, por lo tanto, a manera de ejemplo en la Fig. 4 se muestra tan solo 1 muon incidiendo sobre la barra centelladora.

2.5. Volúmenes sensibles

Un volumen declarado como detector sensible (SD, del inglés Sensitive Detector) permite obtener información sobre la energía depositada por la interacción radiación-materia, lo cual para efectos de nuestra simulación será la lectura de salida del sistema de detección. Para lograr que un volumen sea SD al paso de las partículas, se usa la clase base proporcionada por GEANT4 llamada `G4VSensitiveDetector`. Adicionalmente, para cada volumen SD también es necesario usar la clase base proporcionada por GEANT4 llamada `G4VHit`, la cual representa los hits (un hit es un impacto inmediato debido a la interacción física de una partícula en la región sensible del detector). Esta clase base permite guardar o mostrar en pantalla información como: posición del paso de la partícula, momento lineal, energía depositada, tiempo de arribo, entre otros. En este trabajo se observan los impactos generados por las partículas y su correspondiente energía depositada en dos volúmenes: la barra centelladora para los muones y en el SiPM para los fotones ópticos. Para lograr esto se declararon los respectivos volúmenes como SD gracias a las siguientes dos clases codificadas por el usuario: `BarSD` y `SiPMSD`, con sus correspondientes clases `BarHit` y `SiPMHit`. Cada clase SD es derivada de la clase `G4VSensitiveDetector` y cada clase hit es derivada de `G4VHit`; en estas clases construidas por el usuario se definen funciones útiles las cuales serán invocadas por el kernel de GEANT4 para obtener la información generada por la interacción entre la radiación y el detector, tal como la energía depositada o los impactos de las partículas en el volumen SD.

3. Procesos físicos asociados a las interacciones radiación-materia

Los procesos físicos describen como las partículas interactúan con la materia. De manera general, los procesos que pueden incluirse en las simulaciones con GEANT4, abarcan los necesarios para el transporte de la radiación ionizante y no ionizante a través de la materia. Durante la implementación de la simulación, es indispensable la definición de estos procesos especificándolos con ayuda de la clase `PhysicsList`. Para esto, GEANT4 proporciona diferentes tipos de listas, en

el caso de esta simulación, es necesario que se incluyan procesos electromagnéticos, como: ionización, *bremsstrahlung*, producción de pares, dispersión de Compton y efecto fotoeléctrico. Además de procesos ópticos como procesos de frontera o superficie, generación de luz de centelleo y el proceso WLS. A continuación revisaremos los procesos físicos que experimentan la barra centelladora y la fibra óptica WLS cuando interactúan con las respectivas partículas.

3.1. Centelleo

El centelleo es un fenómeno físico que implica la emisión de destellos de luz en la barra centelladora cuando una partícula cargada o un fotón de alta energía interactúan con el material que la compone. La interacción produce una cascada de ionizaciones que excitan a los átomos de dicho material, lo que resulta en la emisión de fotones ópticos que pueden ser detectados por un foto-sensor como el SiPM. El número de fotones emitidos está relacionado con la energía de la partícula o del fotón de alta energía incidente.

La detección del centelleo se utiliza para medir la energía de las partículas incidentes y para identificar el tipo de partícula o radiación ionizante. Los detectores de centelleo se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la detección de radiación en la medicina nuclear, la identificación de partículas en la física de partículas y la detección de radiación en la seguridad nuclear y la protección contra la radiación.

En la Fig. 5 se muestra un esquema de como se genera el proceso de centelleo en una barra centelladora. Se puede ver como una partícula cargada como el muon incide sobre la barra centelladora y dentro de ella provoca la emisión de los fotones ópticos, algunos de estos fotones llegan hasta el foto-sensor SiPM. Ahora, en la Fig. 4 se reproduce este proceso de centelleo pero usando GEANT4; en verde se puede ver las trayectorias de los fotones ópticos emitidos dentro de la barra centelladora como resultado de la interacción de un muon (línea azul) con energía de 4 GeV incidiendo perpendicularmente sobre esta barra.

Cada centellador tiene su espectro de emisión, como el mostrado en la Fig. 3, que depende de la energía de excitación de los electrones de los átomos. Debido a esto, cuando

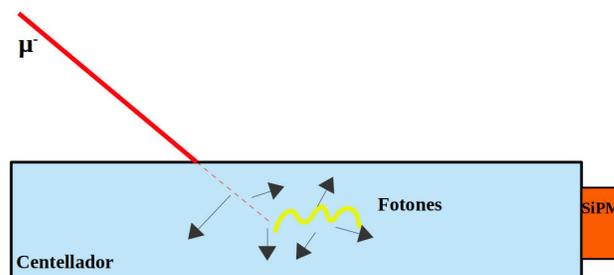


FIGURA 5. Descripción gráfica del proceso de centelleo. Se emite un muon (en rojo), interactúa con la barra centelladora (en azul) produciendo fotones que posteriormente son detectados por el SiPM.

se requiera hacer el montaje en el laboratorio es importante seleccionar un centellador óptimo para cada experimento, ya que los foto-multiplicadores conectados al centellador deben de ser sensibles al espectro de emisión del mismo. Como ya se mencionó, en nuestra simulación vamos a usar un centellador plástico de referencia BC-408, el cuál podría estar acorde a la referencia de SiPM especificada anteriormente.

3.2. Transporte de fotones en la fibra óptica WLS

Las fibras ópticas WLS en los detectores de partículas son utilizadas para mejorar el rendimiento del detector, debido a que colectan la luz de centelleo y cambian la longitud de onda a la más apropiada para el espectro de entrada del foto-sensor SiPM utilizado; además tienden a disminuir la auto-absorción de fotones.

Los materiales WLS absorben los fotones ópticos producidos por el material centelleante y luego los re-emiten con una longitud de onda mayor, esta luz sufre una atenuación al propagarse a lo largo de la fibra. Las principales propiedades que caracterizan a WLS son el tiempo de subida y bajada y el espectro de absorción y emisión. Estas propiedades pueden ser simuladas dentro de GEANT4, especificando los parámetros para cada material de la WLS.

Así como se debe definir las propiedades del material centelleante, también se debe definir todos los procesos físicos y partículas secundarias que serán consideradas en la simulación, como ya se mencionó antes registrando todo esto en la `PhysicsList` de GEANT4, permitiendo así los procesos ópticos como el centelleo y el proceso de cambio de longitud de onda. Adicionalmente, los parámetros de algunos procesos físicos pueden ser ajustados, por ejemplo, activando el proceso de radiación de sincrotrón, permitiendo tiempos de aumento finito en los procesos de centelleo, ó ajustando el tiempo de decaimiento del espectro del proceso de WLS a una función exponencial mejor que una función delta. Además si el rendimiento y la excitación del centellador depende de la partícula, se debe adicionar esos dos factores llamados `ScintillationYieldFactor` y `SetScintillationExcitationRatio`, respectivamente.

En GEANT4, la física óptica tiene una posición excepcional entre los procesos físicos, ya que esto adiciona partículas especiales (fotones ópticos) y nuevas propiedades para los materiales y las superficies ópticas. Siendo la única partícula que puede ser reflejada ó refractada en la superficie óptica, así como también siendo la única partícula creada en los procesos ópticos tal como el centelleo, la radiación Cherenkov, y WLS, hace que la clase `G4OpticalPhoton` difiera del fotón “usual” de la física de partículas de la clase `G4Gamma`.

4. Respuesta del detector

La respuesta del sistema de detección es configurada por el usuario según sus necesidades. En esta simulación luego de codificar las clases `BarSD`, `SiPMMSD`, `BarHit` y `SiPMHit`

para poder tener una lectura de la información generada por la interacción entre el detector y el flujo de partículas, se obtiene algunos datos que sirven para controlar si la simulación cumple con los conceptos físicos involucrados. Por lo tanto, en esta sección describiremos las herramientas de análisis utilizadas y la respectiva información recopilada.

4.1. Herramientas para el análisis

Para el procesamiento de los eventos se utiliza la clase `G4Event`, con esta clase se recopila y gestiona la información generada con las clases `BarHit` y `SiPMHit` creadas por el usuario. Para la extracción de la información de cada evento es necesario utilizar la clase `G4THitsCollection`, permitiendo que cada evento sea identificado para así poder almacenar la información deseada en un archivo de texto plano. Para el análisis de los datos obtenidos se puede usar cualquier herramienta computacional, en nuestro caso usamos las librerías `Matplotlib` y `Statistics` del lenguaje de programación `Python` [21].

4.2. Impactos en la barra centelladora

Cuando el flujo de partículas atraviesa los materiales, en este caso la barra centelladora, se generan los impactos. Estos impactos generan la información en este volumen sensible la cual es almacenada y luego analizada mediante las herramientas antes descritas. En la Fig. 6 se muestra la gráfica de las coordenadas (X , Z) de los puntos de impacto cuando un flujo de 1000 muones con una energía inicial entre 2 y 6 GeV interactúa con la barra centelladora. Siendo X el ancho y Z el largo de la barra. Vale la pena recordar que el flujo de partículas fue generado siguiendo una distribución aleatoria uniforme dentro una área cuadrada de 1 cm de lado.

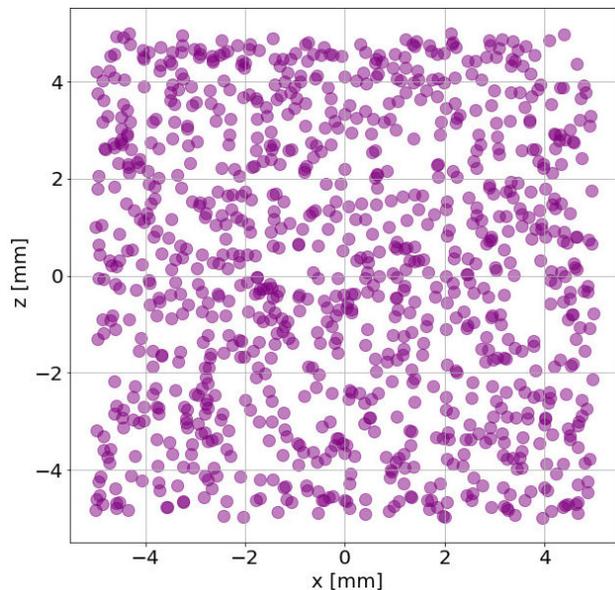


FIGURA 6. Impactos generados cuando un flujo de 1000 muones con energía inicial entre 2 y 6 GeV interactúa con la barra centelladora.

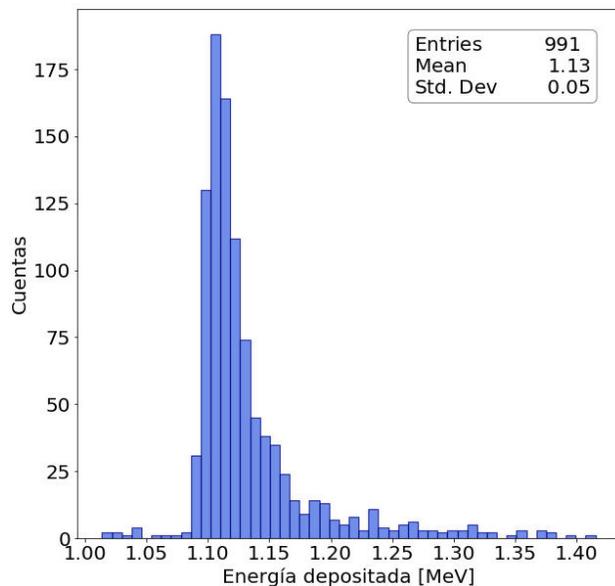


FIGURA 7. Histograma de la energía depositada cuando un flujo de 1000 muones con energía entre 2 y 6 GeV impactan en la barra centelladora.

4.3. Energía depositada en la barra centelladora

La energía depositada se obtiene cuando el flujo de partículas interactúa con los átomos de los materiales transfiriendo parte de su energía cinética. En este caso se habla de la energía depositada en la barra centelladora que se declaró como SD. En la Fig. 7 se muestra el histograma de la energía depositada en la barra centelladora por el flujo de 1000 muones con energía inicial entre 2 y 6 GeV. Como se puede ver, los impactos depositan una energía con un valor medio de 1.13 MeV.

4.4. Impactos en el SiPM

Cuando el flujo de 1000 muones impactan sobre la barra centelladora se generan fotones ópticos los cuales viajan en todas las direcciones a través de la barra. La fibra óptica WLS dentro de ella evita que sean reabsorbidos, transportándolos así en su gran mayoría hacia el foto-sensor SiPM (ver Fig. 8). Como el SiPM también fue declarado volumen SD, en él se puede obtener las coordenadas de los impactos generados por los fotones ópticos. En la Fig. 9 se muestra la gráfica de las coordenadas (X , Y) de los impactos de los fotones ópticos en el SiPM, las coordenadas X e Y representan el ancho y el alto del SiPM. De la figura se puede observar que los impactos forman una área circular de 1 mm de diámetro, correspondiente al diámetro de la fibra óptica WLS construida; también se puede observar que algunos fotones ópticos impactan fuera de esta área circular, los cuales llegan a la superficie cuadrada de 1 mm del SiPM propagándose únicamente a través de la barra centelladora. Como se puede ver en la figura la estadística de estos fotones es baja, siendo así conveniente el uso de la fibra WLS.

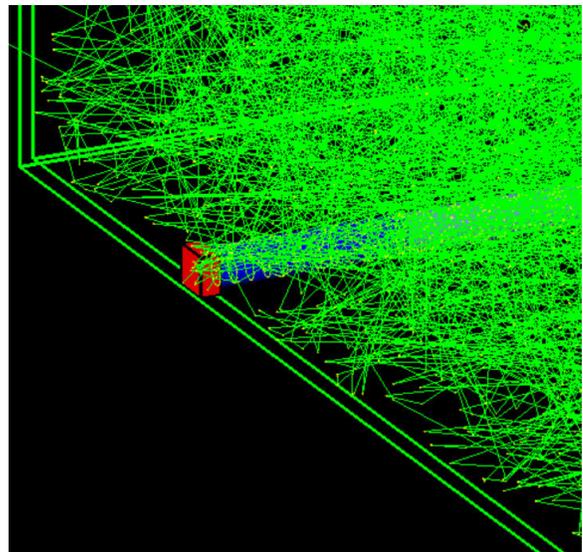


FIGURA 8. Trayectorias de los fotones ópticos (en verde) dentro de la barra centelladora, algunos de estos fotones se transportan dentro de la fibra óptica WLS (en azul) e impactan sobre el SiPM (en rojo).

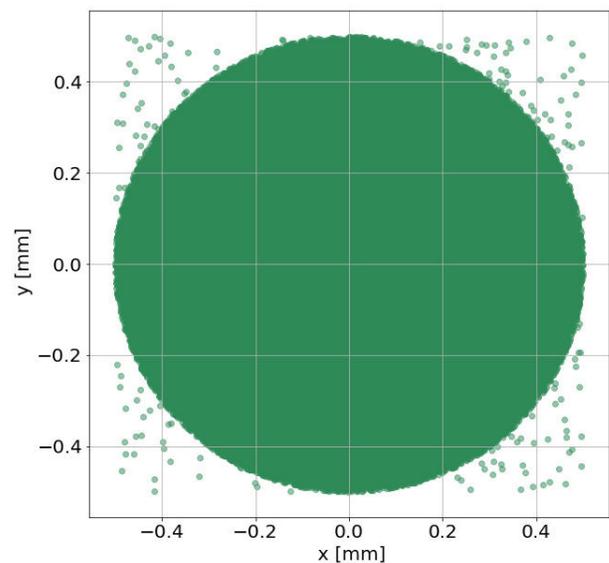


FIGURA 9. Impactos en el SiPM de millones de fotones ópticos generados en la barra centelladora por un flujo de 1000 muones con energía entre 2 y 6 GeV.

4.5. Energía depositada en el SiPM

En este caso, la energía depositada se obtiene cuando millones de fotones ópticos generados por el flujo de 1000 muones impactan en el SiPM que se declaró como SD. En la Fig. 10 se muestra el histograma de esta energía depositada en el SiPM por los fotones ópticos viajando a través de la fibra óptica WLS. Del histograma se puede ver que el valor medio de esta energía depositada es de 2.43 eV. Teniendo en cuenta el número de fotones que depositan energía, también se puede calcular la fracción de fotones que son detectados en el

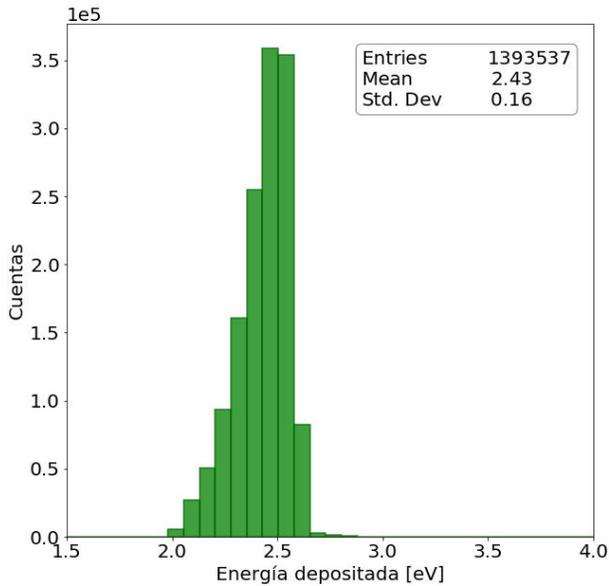


FIGURA 10. Histograma de la energía depositada en el SiPM por los fotones ópticos generados cuando un flujo de 1000 muones con energía entre 2 y 6 GeV impactan la barra centelladora.

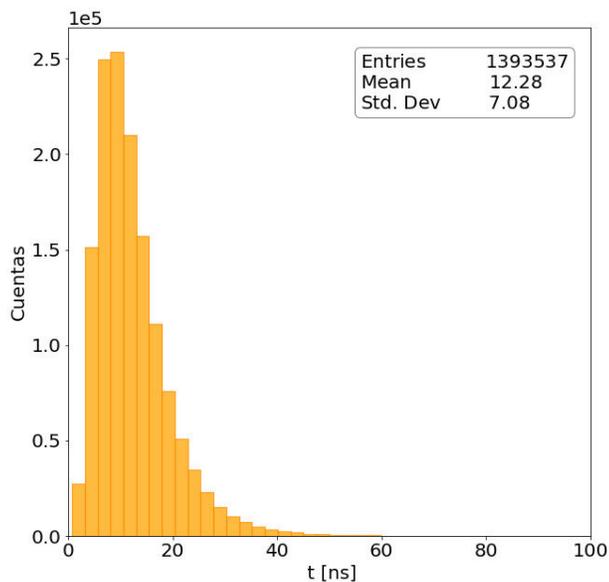


FIGURA 11. Histograma del tiempo de arribo de los fotones ópticos en el SiPM.

SiPM respecto al total de fotones producidos por centelleo, la cual resulta ser de 9.7 %.

4.6. Tiempo de arribo de los fotones ópticos en el SiPM

Debido a la distancia de 6 cm que hay desde la fuente del flujo de muones sobre la barra centelladora, el tiempo de arribo de

estos muones a la barra es casi instantáneo. Pero si nos enfocamos en el tiempo de arribo de los fotones ópticos al SiPM, este valor de tiempo es muy diferente a cero. En la Fig. 11 se puede ver el histograma del tiempo de arribo de estos fotones ópticos en el preciso instante que impactan en el SiPM. Del histograma se puede ver que esta gran cantidad de fotones ópticos arriban en un tiempo medio de 12.28 ns después que son generados por la interacción del flujo de muones con la barra centelladora. En el laboratorio, este tiempo se suele asociar al tiempo de respuesta del detector, que se define como el tiempo que tarda el detector en generar una señal de salida, desde el instante en que la radiación incidió sobre este.

5. Conclusiones

Se implementó una simulación en GEANT4 escogiendo unas propiedades de los materiales y geometrías que es capaz de reproducir la respuesta de detectores de centelleo plástico, los cuales son muy utilizados en experimentos de rayos cósmicos, medicina y física de altas energías. El desarrollo de la simulación inicia con la energía depositada y los impactos generados por las partículas en la barra centelladora, seguidamente se obtiene la propagación de los fotones ópticos por toda la barra, fibra óptica WLS y finalmente se obtiene la energía depositada, las coordenadas de los impactos detectados por el SiPM y sus respectivos tiempos de arribo. Una mejor selección de los materiales y la geometría utilizados en esta simulación dependerá de los objetivos científicos de los experimentos dependiendo de la energía y el tipo de partícula primaria.

Las simulaciones de barras centelladoras son útiles para estudiar la mejor posición de los SiPM en las barras centelladoras, seleccionar un buen tamaño, mejorar su eficiencia de colección de fotones con el uso de la fibra óptica WLS, también para estudiar la sensibilidad de los detectores a la energía y la intensidad de las fuentes de partículas, como se muestra en Ref. [15]. En este sentido, este trabajo puede servir como guía de usuario para estudiantes de habla hispana que estén interesados en implementar la simulación y luego seleccionar el mejor diseño de un sistema de detección usando barras centelladoras, fibra óptica WLS y foto-multiplicador de silicio SiPM

Agradecimientos

P.P. y R.B. agradecen al ITM porque este trabajo fue parcialmente soportado por el “Centro de Laboratorios de investigación parque i-ITM, proyecto P20246”. A.T. también agradece a la “Vicerrectoría de CyT-UdeMedellin” por todo el soporte durante el desarrollo de este trabajo.

1. W. Murillo, O. Zapata, and C. Valencia, Construcción de la noción de onda y el fenómeno de interferencia en el grado noveno. Tesis de Licenciatura. (Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2016) pp. 1-161. <https://hdl.handle.net/10495/28174>.
2. C. P. Achenbach, Active optical fibres in modern particle physics experiments, (2004). <https://doi.org/10.48550/arXiv.nucl-ex/0404008>.
3. Hamamatsu, Photomultiplier tubes, basic and applications, 4th ed. (Hamamatsu Photonics K. K., 2017).
4. P. Buzhan *et al.*, The Advanced Study Of Silicon Photomultiplier, in Advanced Technology and Particle Physics (World Scientific, 2002). <https://doi.org/10.1142/97898127764640101>
5. C. Piemonte and A. Gola, Overview on the main parameters and technology of modern silicon photomultipliers, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **926** (2019) 2, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.119>.
6. Pierre Auger Collaboration, The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **798** (2015) 172, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.058>.
7. A. Weber, MINOS the main injector neutrino oscillation search, *Nucl. Phys. B: Proc. Suppl.* **98** (2001) 57, [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(01\)01195-1](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(01)01195-1).
8. N. Agafonova *et al.*, The OPERA experiment, *Nucl. Part. Phys. Proc.* **267-269** (2015) 87, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.087>.
9. A. Etchegoyen (PierreAuger), AMIGA, AugerMuons and In fill for the Ground Array, in 30th *International Cosmic Ray Conference*, **5** (2007) 1191,
10. R. L. Murray and K. E. Holbert, Nuclear Energy, 8th ed. (Elsevier, 2019)
11. P. Lecoq, A. Gektin, and M. Korzhik, Inorganic Scintillators for Detector Systems (Springer International Publishing, 2017). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45522-8>.
12. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement (Wiley, 2010) pp. 45-47.
13. GEANT4, Geant4 user's guide for application developers (2020).
14. K. P. Rodríguez-Serrano, M. A. Maya-Restrepo, and J. S. Jaén-Posada, Educación en ingenierías: de las clases magistrales a la pedagogía del aprendizaje activo, *Ing. Desarro.* **30** (2012) 125.
15. E. Márquez Quintos, C. H. Zepeda Fernández, L. F. Rebollo-Herrera, and E. Moreno Barbosa, Intrinsic time resolution and efficiency study for simulated scintillators plastics with geant4, *Rev. Mex. Fis.* **69** (2023) 0409011, <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.69.040901>
16. J. Allison *et al.*, Recent developments in Geant4, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **835** (2016) 186, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>.
17. M. Electronics, Silicon photomultipliers (sipm), low- noise, blue-sensitive (2020).
18. M. Electronics, Premium plastic scintillators (2020).
19. R. Ghadiri and J. Khorsandi, Studying the response of a plastic scintillator to gamma rays using the Geant4 Monte Carlo code, *Appl. Radiat. Isot.* **99** (2015) 63, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.02.017>.
20. R. L. Workman and Others (Particle Data Group), "Cosmic rays" (Section 30), *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022** (2022) 083C01.
21. W. McKinney, Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, Num Py, and I Python (2nd Edition) (O'Reilly Media, 2017).