



**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**Facultad de Ciencias Físico Matemáticas**

Medición de la resolución temporal intrínseca para distintas medidas  
de arcos de un detector centellador BC404.

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

Requisito para la obtención del grado de

**Licenciado en Física Aplicada**

Por

Luis Andrés Hernández Cruz

Director de tesis

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández

Dr. Eduardo Moreno Barbosa

Co-director de tesis

Dra. Lucina Gabriela Espinoza Beltrán

Puebla, México

Mayo de 2021

# Agradecimientos

A los Dres. Cristian Heber Zepeda Fernández, Lucina Gabriela Espinoza Beltrán, y Eduardo Moreno Barbosa de la FCFM-BUAP por su respaldo y asesoría en la realización de esta tesis.

A la Dra. Lucina por proporcionar los archivos y esquemas de las simulaciones utilizados en el presente trabajo de tesis.

A la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla que me dio la oportunidad de desarrollarme como estudiante y futuro profesionista.

A mi madre Yazmin Cruz Bautista y a mi padre Luis Hernández Rosas, quienes me han ayudado durante toda la carrera. Dándome con mucho esfuerzo y amor los bienes necesarios para alcanzar mis metas.

A Josué y Silem, compañeros de generación que siempre me han brindado una excelente disposición tanto académica como de amistad.

# Dedicatorias

Dedicado a mi madre Yazmin, a mi padre Luis y hermana Denisse quienes me han dado apoyo incondicional a lo largo de mi vida y de mi carrera.

A mi familia por ser siempre un fuerte apoyo emocional e inspiración.

# Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo medir la resolución temporal intrínseca de distintas celdas de los anillos que componen al detector contador haz-haz (BEam-BEam) nombrado BEBE. Esto a partir de simulaciones en Geant4 de incidencia de muones con 1 GeV de energía cinética en las celdas 0, 33 y 65 de los anillos 0, 2 y 4 respectivamente. Para caracterizar cada celda se calculó la resolución temporal intrínseca, y las simulaciones se hicieron al considerar el área efectiva (Scorer) de un fotomultiplicador de silicio (SiPM) de  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  ubicado en dos posiciones: centro y en una esquina de la celda. Además, para estas configuraciones se consideraron tres casos de incidencia de los muones: 1) en el centro, 2) en la esquina y 3) distribución aleatoria de la cara frontal y opuesta la ubicación del Scorer de la celda. Los datos del tiempo de llegada de los fotones por evento obtenidos de la simulación generaron un conjunto de distribuciones de Landau. Por lo que extrajimos la media de cada distribución del ajuste de Landau para cada evento. Finalmente, con este conjunto de medias se generó una distribución gaussiana y por medio de un ajuste gaussiano, se extrajo la varianza “ $\sigma$ ”, que es la resolución temporal intrínseca. Los casos 1 y 2 generaron una única distribución de Gauss, mientras que el caso 3 al ser el promedio de todos los puntos de incidencia se obtuvieron en la mayoría de las configuraciones una distribución con distintas gaussianas. Se concluyó que la incidencia aleatoria de muones con ubicación del SiPM en el centro de la celda tiene la mejor resolución temporal intrínseca para las celdas 0, 33 y 65. Finalmente, se calculó la eficiencia de cada configuración, de la cual no hubo una diferencia significativa para el caso de incidencia aleatoria de los muones con el SiPM en el centro o en la esquina.

**Palabras clave:** *resolución temporal intrínseca, SiPM.*

# Objetivos

## Objetivo General

Medir la resolución temporal intrínseca en una de las celdas de los anillos que componen al detector semicircular de BeBe.

## Objetivos Específicos

- Obtener la distribución de Landau del tiempo de vuelo de los fotones al SiPM en cada SiPM y determinar el valor medio de la distribución de Landau.
- Obtener una distribución Gaussiana usando el conjunto de todas las medias del ajuste de Landau e identificar " $\sigma$ " que es la resolución temporal intrínseca (independiente de los componentes electrónicos).
- Obtener la eficiencia de detección de la celda, es decir, la razón entre fotones detectados y fotones creados para las distintas configuraciones.

# Índice General

Agradecimientos.....	I
Dedicatorias.....	II
Resumen.....	III
Objetivos.....	IV
Capítulo 1.....	1
Introducción.....	1
1. Antecedentes .....	1
1.1. El complejo de colisionadores NICA.....	1
1.1.1. El detector MPD.....	1
1.1.2. El detector Forward .....	3
1.2. Detector de centelleo .....	3
1.2.1. Plástico centellador BC-404.....	3
1.3. Fotomultiplicadores de silicio (SiPM) y tubos fotomultiplicadores (PMT).....	5
1.4. Aplicaciones.....	6
1.5. El grupo MexNICA y el detector BEBE .....	6
1.6. Geant4.....	8
Capítulo 2.....	9
Metodología.....	9
2.1. Metodología .....	9
2.1.1. Definiciones.....	9
2.2. Descripción de la simulación.....	9
2.3. Medición de la resolución temporal intrínseca .....	11
2.4. Cálculo de la eficiencia.....	12
Capítulo 3.....	15
Resultados y análisis .....	15
3.1 Media y $\sigma$ de las configuraciones en la celda 0 .....	16
3.2 Media y $\sigma$ de las configuraciones en la celda 33 .....	18
3.3 Media y $\sigma$ de las configuraciones en la celda 65 .....	18

3.4	Tiempo medio de llegada en función de la posición .....	19
3.5	Resolución temporal intrínseca en función de la posición .....	20
3.6	Cálculo de la eficiencia .....	22
	Conclusiones y discusión .....	25
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>27</b>
	<b>Apéndice .....</b>	<b>28</b>
	<b>Apéndice A: Ajustes a la distribución de Gauss para las distintas configuraciones de las celdas</b> <b>0, 33 y 65.....</b>	<b>28</b>

# Índice de Tablas

## Capítulo 1

**Tabla 1.1.** Propiedades y composición atómica del plástico centellador BC-404 ..... 4

**Tabla 1.2.** Datos técnicos generales del plástico centellador BC-404 ..... 4

**Tabla 1.3.** Radios de los anillos del detector BEBE ..... 7

## Capítulo 3

**Tabla 3.1.** Media y  $\sigma$  de los ajustes de Gauss para la distribución obtenida de los datos de la simulación de la celda 0 en el anillo 0 ..... 17

**Tabla 3.2.** Media y  $\sigma$  de los ajustes de Gauss para la distribución obtenida de los datos de la simulación de la celda 33 en el anillo 2 ..... 18

**Tabla 3.3.** Media y  $\sigma$  de los ajustes de Gauss para la distribución obtenida de los datos de la simulación de la celda 65 en el anillo 4 ..... 19

**Tabla 3.4.** Eficiencia de las distintas configuraciones para las celdas 0, 33 y 65 ..... 22

# Índice de figuras

## Capítulo 1

<b>Figura 1.1.</b> Esquema del complejo NICA .....	2
<b>Figura 1.2.</b> Esquema del Multi-Purpose Detector (MPD) .....	2
<b>Figura 1.3.</b> Espectro de emisión del plástico centellador BC-404 .....	5
<b>Figura 1.4.</b> Esquema con geometría nominal del detector BEBE.....	7

## Capítulo 2

<b>Figura 2.1.</b> Esquemas de las configuraciones de las celdas 0, 33 y 65.....	10
<b>Figura 2.2.</b> Ejemplo de ajuste de Landau a la distribución del tiempo de llegada de los fotones al SiPM .....	11
<b>Figura 2.3.</b> Ejemplos de ajuste a las distribuciones de Gauss para el caso de interacciones aleatorias de los muones en toda la cara de la celda .....	13

## Capítulo 3

<b>Figura 3.1.</b> Ajustes a la distribución de Gauss para las distintas configuraciones de la celda 0 en el anillo 0.....	15
<b>Figura 3.2.</b> Ajustes a la distribución de Gauss para las distintas configuraciones de la celda 33 en el anillo 2.....	16
<b>Figura 3.3.</b> Gráficas de la media del conjunto de las medias del ajuste de Landau contra la ubicación de las interacciones en la celda 0, 33 y 65.....	20
<b>Figura 3.4.</b> Gráficas de la resolución temporal intrínseca contra la ubicación de las interacciones en la celda 0, 33 y 65 .....	21
<b>Figura 3.5.</b> Gráficas de la eficiencia de la celda 0, 33 y 65 contra la interacción de los muones para el SiPM en centro y en la esquina.....	23

# Capítulo 1

## *Introducción*

En este capítulo se presenta el estado del arte del complejo NICA, en particular de uno de sus detectores, el MPD. Se explica brevemente el funcionamiento de los detectores de centelleo y las especificaciones del plástico centellador BC-404. Se abordan las ventajas de usar fotomultiplicadores de silicio en contra de los tubos fotomultiplicadores. Además, se presenta el estado del arte del grupo MexNICA y el detector BEBE. Finalmente, se presenta el kit de herramientas de simulación Geant4.

---

### **1. Antecedentes**

#### **1.1. El complejo de colisionadores NICA.**

En el laboratorio Joint Institute for Nuclear Research (JINR), ubicado en la ciudad de Dubna en la Federación de Rusia, se encuentra el complejo de colisionadores Nuclotron Ion Collider Facility (NICA), como se muestra en la Figura 1.1. NICA tiene como objetivo principal colisionar núcleos de iones pesados con el fin de estudiar las propiedades del diagrama de fase de la materia que interactúan fuertemente a alta densidad de bariones. Para ello se planea instalar dos grandes detectores de partículas: Spin Physics Detector (SPD) y Multi-Purpose Detector (MPD) [1]. El esquema del MPD se puede ver en la Figura 1.2.

##### **1.1.1. El detector MPD**

El MPD es un complejo experimental que estará localizado en uno de los puntos de interacción de NICA, tal como se observa en la Figura 1.1. Compuesto por los detectores Central (CD) y Forward (FD). Su objetivo es detectar hadrones cargados, electrones y fotones producidos en colisiones de iones pesados con energías de centro de masa ( $\sqrt{s_{NN}}$ ) en un rango de 4 a 11 GeV para Au+Au y hasta 27 GeV para p+p [1, 4, 5]. El principal objetivo es la localización del llamado punto crítico de la materia hadrónica en el diagrama fase Temperatura-Densidad Bariónica [6].

Las operaciones en NICA estarán divididas en dos etapas. Para la primera etapa el grupo del MPD se centrará en los estudios de los rendimientos y espectros de las partículas, las fluctuaciones evento por evento, el flujo colectivo para hadrones identificados y las ondas electromagnéticas. Durante la segunda etapa, el grupo MPD se ocupará de las multiplicidades totales de las partículas, las asimetrías y la producción de dileptones, charmonia, fotones blandos e hipernúcleos [4]. Para lograr tales objetivos es necesario garantizar una toma de datos óptima, por lo que sería ventajoso contar con un sistema capaz de proporcionar una señal de disparo de nivel 0 y ayudar a determinar observables importantes como el plano de reacción, la centralidad de la colisión, así como ayudar a discriminar los eventos verdaderos de los eventos de interacción haz-gas [4].

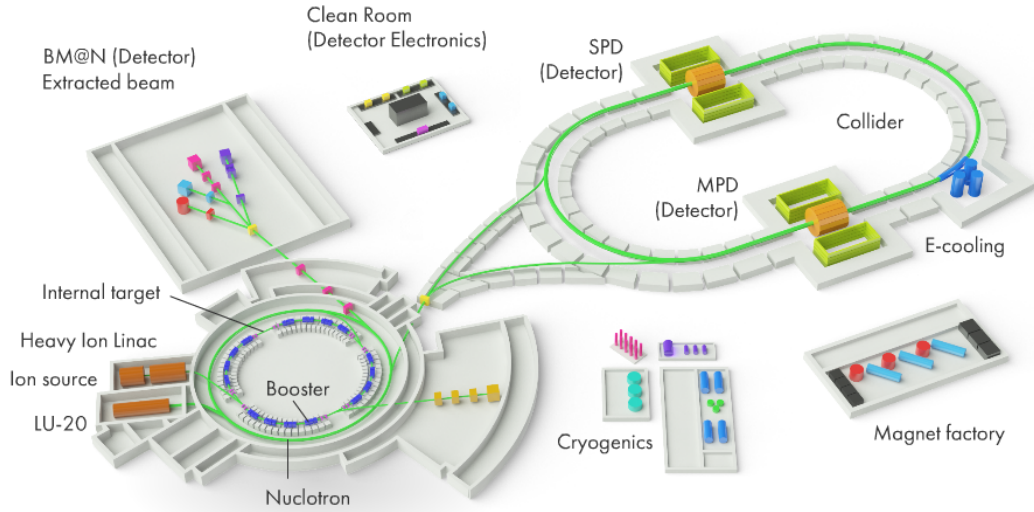


Figura 1.1. Esquema del complejo NICA que será construido en el laboratorio Joint Institute for Nuclear Research [2].

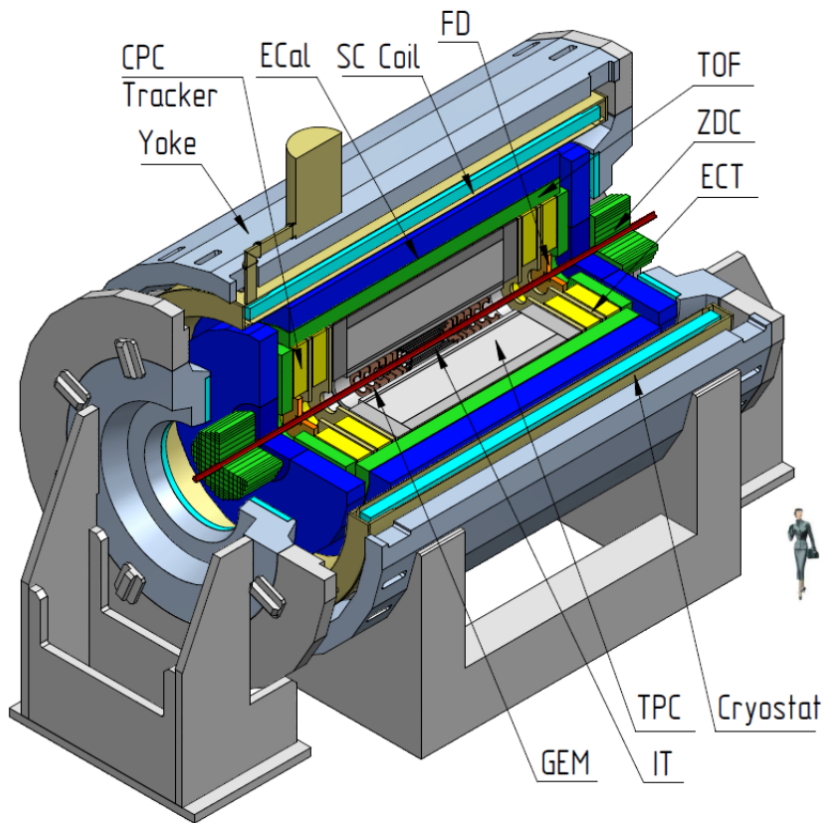


Figura 1.2. Esquema del MPD que será construido en el laboratorio Joint Institute for Nuclear Research [3].

### **1.1.2. El detector Forward**

El detector V0 ALICE-LHC construido con plástico centelleante BC404 y BC408 es un ejemplo de este tipo de detector, la luz recogida es transportada a los fotomultiplicadores (PMT) utilizando fibras ópticas. Este ha funcionado muy bien como principal detector de centralidad para ALICE a las energías del LHC, durante el Run 1 y el Run 2 [4]. ALICE utilizará un nuevo Fast Interaction Trigger (FIT) para el próximo LHC Run 3, con el esperado incremento de seis veces en la luminosidad Pb-Pb y la tasa de interacción de 50 kHz. El FIT incluirá un gran anillo de plástico centelleante con fibras ópticas transparentes y PMTs y dos conjuntos de radiadores de cuarzo acoplados a sensores MCP que proporcionarán una resolución temporal para colisiones Pb-Pb de 30 ps o menos [4].

En el caso de la primera Run de NICA-MPD, con una luminosidad limitada de  $5 \times 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y una tasa en colisiones Au+Au a la máxima energía de hasta 7 KHz, por lo que en [4] sugieren que es conveniente contar con un detector capaz de identificar eventos de colisión verdaderos con una resolución de tiempo de alrededor de 30 ps para proporcionar una señal de activación del Tiempo de Vuelo (TOF) en eventos de baja multiplicidad, como los provenientes de reacciones p+p o p+A [4].

En [1] se plantea que el detector FD en el MPD tiene como objetivo proporcionar un desencadenante de interacción rápido y una señal de sincronización para el tiempo de vuelo (TOF). También, en [3] se contempla que podría ayudar mucho en el ajuste de las colisiones de haz a haz en el centro del MPD y en el control operativo de la tasa de colisión y la posición del punto de interacción durante una Run.

De acuerdo con [1,5], como el momento transversal medio de las partículas producidas en una colisión a energías NICA es inferior a 500 MeV/c, el diseño del detector requiere un presupuesto de material muy bajo.

## **1.2. Detector de centelleo**

Los elementos básicos de un detector de centelleo consisten en un material centelleante que se acopla ópticamente a un fotomultiplicador, ya sea directamente o a través de una guía de luz. Una vez que una partícula pasa a través del material centelleante, los átomos o moléculas que lo componen se excitan y emiten fotones ópticos. Esta luz es transmitida a un fotomultiplicador en donde es convertida en una corriente débil de fotoelectrones los cuales son todavía más amplificados por un sistema multiplicador de electrones [7].

### **1.2.1. Plástico centellador BC-404**

En física nuclear y de partículas uno de los componentes más utilizados son los detectores de centelleo. Este material al ser golpeado por una partícula o radiación nuclear emite un pequeño destello de luz o lo que es lo mismo un centelleo [7]. Si a este se le acopla un dispositivo de amplificación tal como un fotomultiplicador, los centelleos pueden ser

convertidos en pulsos eléctricos a los cuales se les analiza y contabiliza electrónicamente para dar información de la partícula incidente [7].

De acuerdo con [8] un plástico centellador típico tiene una emisión con un máximo de alrededor de 425 nm. Las características comunes de los centelladores de plástico son: una emisión de luz relativamente grande y un corto tiempo de decaimiento de unos 2 ns. Por lo que es posible hacer mediciones rápidas de tiempo con este tipo de material. Va a depender del tipo de activador orgánico y del material la longitud de onda exacta y el tiempo de decaimiento. El centellador de plástico BC-404 se utiliza principalmente como láminas finas para la detección alfa y beta [8]. También puede utilizarse en aplicaciones de recuento rápido. Este plástico centellador tiene las propiedades que se muestran en las Tablas 1.1 y 1.2.

**Tabla 1.1. Propiedades y composición atómica del plástico centellador BC-404 [9].**

<b>Propiedades del centelleo</b>	BC-404
Rendimiento lumínico, %Antraceno	68
Tiempo de subida (ns)	0.7
Tiempo de relajación (ns)	1.8
Ancho del pulso, FWHM, (ns)	2.2
Longitud de onda de emisión máxima (nm)	408
Longitud de atenuación de la luz (cm)	140
Longitud de atenuación de la luz a gran escala (cm)	160
<b>Composición atómica</b>	
Número de átomos de H por cc ( $\times 10^{22}$ )	5.21
Número de átomos de C por cc ( $\times 10^{22}$ )	4.74
Proporción de átomos H:C	1.1000
Número de electrones por cc ( $\times 10^{23}$ )	3.37

**Tabla 1.2. Datos técnicos generales del plástico centellador BC-404 [9].**

Base	Poliviniltolueno (Polyvinyltoluene)
Densidad (g/cc)	1.023
Coefficiente de expansión (por °C, < 67°C)	$7.8 \times 10^{-5}$
Índice de refracción	1.58
Punto de reblandecimiento	70°C
Presión de vapor	Puede utilizarse en vacío
Solubilidad	Soluble en disolventes aromáticos, disolventes clorados, acetona, etc. No se ve afectado por el agua, los ácidos diluidos, los alcoholes inferiores, los álcalis y los fluidos de silicona pura o las grasas.
Rendimiento lumínico	A +60°C = 95% de la de +20°C. Independiente de la temperatura de -60°C hasta +20°C.

Como se muestra en la Tabla 1.1 el principal compuesto centelleante del plástico BC-404 es el antraceno que es un hidrocarburo aromático policíclico. También, nos fijamos en el tiempo

de subida que es tiempo que tarda en darse el centelleo y tiempo de extinción que es el tiempo que tardan en volver los electrones a su estado base. Otro punto importante es longitud de onda en la que se alcanza la máxima emisión, esto se puede ver en la Figura 1.3 que muestra el espectro de emisión para el plástico centellador BC-404 y el pico es alcanzado en un rango próximo al ultravioleta.

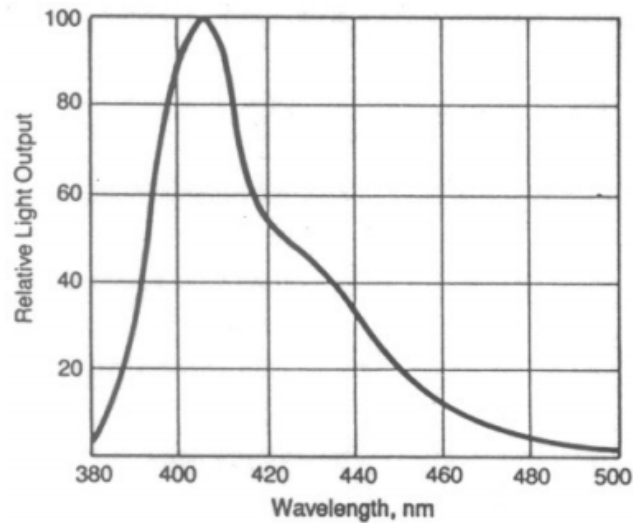


Figura 1.3. Espectro de emisión del plástico centellador BC-404 [9].

### ***1.3. Fotomultiplicadores de silicio (SiPM) y tubos fotomultiplicadores (PMT)***

Los fotomultiplicadores son detectores de fotones ópticos, los cuales son producidos en la interacción de una partícula con algún material centelleante. Además, para la recopilación de datos resulta importante la baja resolución temporal en un detector [10], debido a la necesidad de tener un detector capaz de identificar eventos de colisión verdaderos con una resolución temporal de alrededor de 30 ps para proporcionar una señal de activación del TOF en eventos de baja multiplicidad.

En el trabajo desarrollado en [4] compararon la resolución temporal entre una configuración con un plástico centellador BC-404 con geometría hexagonal (1) acoplado a un Hamamatsu PMT R6249 y (2) acoplado a un SensL (C-60035-4P-EVB) SiPM. El análisis de los datos para la configuración (1) arrojó que la mejor resolución temporal alcanzada fue de  $68 \pm 5$  ps, mientras que para la configuración (2) la mejor resolución temporal alcanzada fue de  $45 \pm 2$  ps.

De acuerdo a [5, 10] los SiPMs cuentan con ventajas tales como bajo costo, menor voltaje de operación de polarización y su menor tamaño, que puede ser de hasta  $1 \times 1$  mm<sup>2</sup>, en comparación con los PMTs. En el trabajo realizado en [10] se midió la resolución temporal

para una configuración con un SiPM Hamamatsu (S10985-050C) acoplado a un plástico centellador BC-404 y posteriormente a un BC-422, con geometría cuadrada. Para ambos materiales se obtuvo una resolución temporal intrínseca de alrededor de 8 ps, sin tomar en cuenta los componentes electrónicos. Finalmente, fue calculada la resolución temporal de la configuración para una Tomografía por Emisión de Positrones (por sus siglas PET) la cual se fue del orden de 100.32 ps, mientras que la configuración de una PET utilizando un PMT había sido reportado con una resolución de temporal de 484 ps [10].

#### **1.4. Aplicaciones**

Como se menciona en [10] la resolución temporal intrínseca disminuye con un área de detección mayor, es decir, con mayor número de fotosensores o el tamaño del centellador. Asimismo, es posible tener la configuración de un centellador para un SiPM y obtener información de cada uno de ellos; entonces es posible la construcción de una imagen con un gran número de pixeles y por tanto un valor bajo de la resolución temporal intrínseca [10]. En este caso se muestra que para una configuración de plástico centelleante BC404 o BC422 es posible obtener una resolución temporal intrínseca baja con uno o cuatro fotosensores SiPM, mejorando la resolución temporal y espacial para una PET en comparación con la configuración en donde se utiliza un PMT. Así, la resolución temporal es muy importante para la adquisición de datos debido a que el tiempo de vida de un isótopo es de 2 minutos en el caso del cerebro o el corazón [10].

#### **1.5. El grupo MexNICA y el detector BEBE**

A mediados del 2016 se conforma el grupo de investigadores y estudiantes llamado MexNICA con el objetivo principal de colaborar en los esfuerzos experimentales de MPD-NICA. Por lo mismo, el grupo propuso un detector contador haz-haz (BEam-BEam) denominado BEBE [5]. Este tipo de detector se denomina “forward” y estará localizado a 2 m del punto de interacción del haz a lo largo del beam pipe. Actualmente para el diseño se considera añadir al detector anillos concéntricos de plástico centellador BC404 de la marca Saint-Gobian, con la finalidad de mejorar la multiplicidad, la discriminación de la interacción haz-gas y localización del punto de interacción. Se consideran cinco anillos concéntricos con diferentes radios como se muestra en la Tabla 1.3 y con un espesor de 1.5 cm, cada anillo estará segmentado en 16 partes. La numeración de las celdas fue tomada a partir de la celda 0 tal como se ve en la Figura 1.4, contando en sentido contrario a las agujas del reloj. Para este trabajo se consideraron celdas específicas de los anillos tal como se explica en el Capítulo 2, en la Figura 1.4 se encuentran etiquetadas en color rojo como C0 para la celda 0 en el anillo 0 (A0), C33 para la celda 33 en el anillo 2 (A2), y C65 para la celda 65 en el anillo 4 (A4).

**Tabla 1.3. Anillos del detector BEBE y radios mínimos y máximos de cada segmento.**

Anillo	Radio mínimo (cm)	Radio máximo (cm)
0	5.10	8.3
1	8.5	14.5
2	14.7	23.4
3	23.6	42
4	42.2	76.63

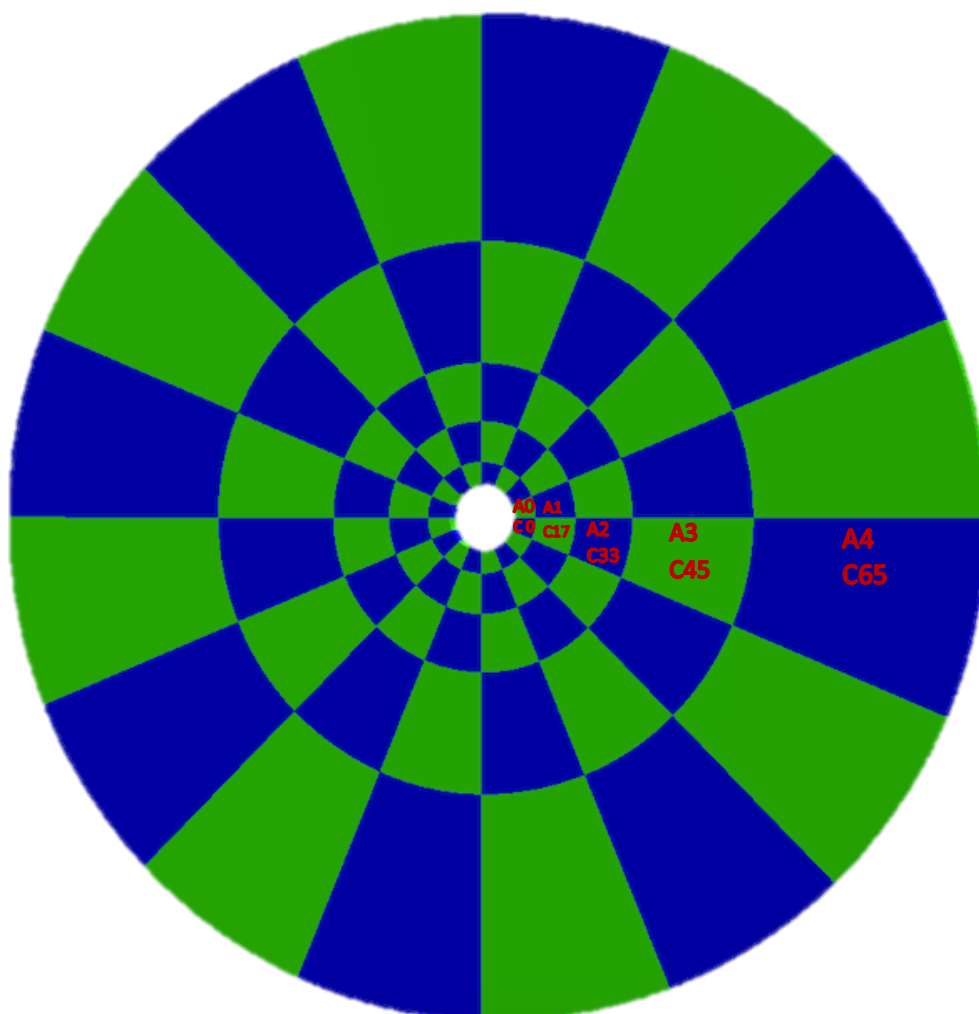


Figura 1.4. Esquema con geometría nominal del detector BEBE compuesto por 80 celdas en color azul y verde distribuidas en 5 anillos concéntricos numerados partiendo del anillo 0 de menor radio hasta el anillo 4.

### **1.6. Geant4**

Geant4 es un kit de herramientas de simulación con el objetivo de simular el paso de partículas a través de la materia con funciones como el seguimiento, la geometría, los modelos de física y los impactos. Para un amplio rango de energía que comienza desde 250 eV hasta el rango de energía TeV Geant4 cubre diversos procesos físicos tales como procesos electromagnéticos, hadrónicos y ópticos, un gran conjunto de partículas de larga vida, materiales y elementos. Por ejemplo, las interacciones hadrónicas desde energías térmicas hasta 1 PeV; las interacciones electromagnéticas de hadrones cargados, iones, leptones y fotones desde 250 eV hasta 1 PeV o más, así como la producción y propagación de fotones ópticos. Maneja geometrías complejas de manera eficiente y compacta, y permite la visualización de la geometría y las pistas de partículas a través de una variedad de interfaces [11].

Gracias a la colaboración entre físicos e ingenieros de software alrededor del mundo ha sido posible el desarrollo de este kit de herramientas, el cual se creó a partir de la ingeniería de software y la tecnología orientada a objetos, todo esto llevado a cabo por medio del lenguaje de programación C++. Es usado en los campos de física de partículas, física nuclear, diseño de aceleradores, ingeniería espacial y física médica con múltiples aplicaciones [11].

# Capítulo 2

## *Metodología*

En este capítulo se describe la metodología aplicada en la realización del presente trabajo de tesis por lo que se definen conceptos que se utilizarán para la descripción de la simulación. Después, se describe brevemente la simulación. Se explica como se midió la resolución temporal intrínseca y como se calculó de la eficiencia.

---

### **2.1. Metodología**

#### **2.1.1. Definiciones**

A continuación, se entenderá como Scorer al área efectiva del SiPM. A su vez, se entenderá como hit o evento al punto de interacción de un muon en el plástico centelleante. También, se define la eficiencia como la razón entre número de fotones detectados y el número de fotones creados.

#### **2.2. Descripción de la simulación**

A partir de simulaciones en Geant4 de celdas del detector BEBE, esquematizado como se ve en la Figura 1.4, caracterizamos la resolución temporal de la celda 0 del anillo 0 (A0 C0), la celda 33 del anillo 2 (A2 C33) y la celda 65 del anillo 4 (A4 C65) que cuentan con distintas medidas de radio como se muestra en la Tabla 1.3 y con un espesor de 1.5 cm. Además, en las simulaciones se tomaron las siguientes consideraciones:

- I. Al llegar los fotones al Scorer estos son absorbidos, es decir, los fotones se detienen al arribar al SiPM con el objetivo de evitar el conteo múltiple de un mismo fotón.
- II. El plástico centelleador fue simulado con una tasa de reflexión del 95% entre el mismo y el entorno.
- III. El SiPM fue colocado en la cara opuesta a los puntos de interacción.

Lo que se simuló fue el área efectiva (Scorer) de un fotomultiplicador de silicio (SiPM) de  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  para las siguientes configuraciones de las celdas 0, 33 y 65:

1. Un SiPM colocado en el centro de la celda como se muestra en la Figura 2.1a, b y c.
2. Un SiPM colocado en la esquina superior de la celda como se muestra en la Figura 2.1d, e y f.

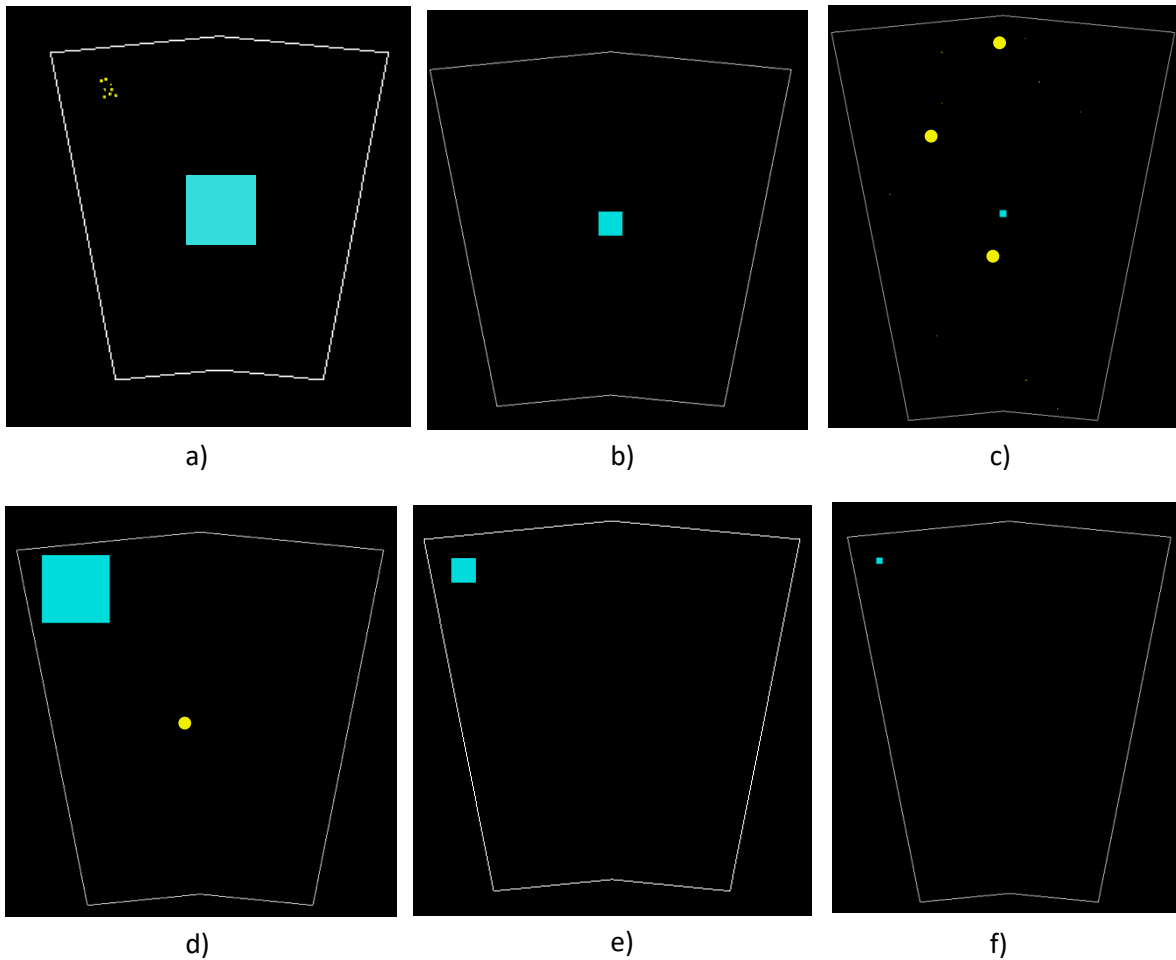


Figura 2.1. Esquemas de las configuraciones de las celdas con el SiPM en color azul claro y las interacciones de los muones en color amarillo. El tamaño de las celdas aumenta según los radios dados en la Tabla 1.3, el SiPM tiene un tamaño fijo de  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ . Celda 0 (a y d), celda 33 (b y e) y celda 65 (c y f) con el SiPM a), b), c) en el centro y d), e), f) en la esquina superior.

Se realizaron 1000 eventos, cada evento fue la incidencia de un muon de 1 GeV de energía cinética a una de las configuraciones de la celda. Dado que buscamos distinguir que el punto de interacción importa, es decir, que la resolución temporal intrínseca depende de la ubicación del SiPM [4, 6]. Ambas configuraciones tuvieron los siguientes casos de interacciones de muones (hits):

- 1) En el centro de la celda como se ve en la Figura 2.1d.
- 2) En la esquina superior de la celda como se ve en la Figura 2.1a.
- 3) Aleatorios en toda la cara de la celda como se ve en la Figura 2.1c.

El archivo de salida de cada la simulación de las celdas con su respectivas configuraciones y casos generó las siguientes columnas con parámetros físicos de nuestro interés:

- Columna 1.- Número de evento (interacción del muon)
- Columna 2.- Posición en X del fotón en el Scorer (mm)
- Columna 3.- Posición en Y del fotón en el Scorer (mm)
- Columna 4.- Posición en Z del fotón en el Scorer (mm)
- Columna 5 y 6.- Energía del fotón (eV)
- Columna 7.- Tiempo de arribo del fotón al Scorer (ps)
- Columna 8.- Nombre de la partícula (fotón óptico)

### ***2.3. Medición de la resolución temporal intrínseca***

Por cada incidencia de un muon en la simulación se crearon un número de fotones ópticos, estos fueron detectados por el SiPM, de la columna 1 y 7 se tomó: el número del evento (interacción del muon) y el tiempo de llegada del fotón asociado a ese evento.

La distribución de llegada de los fotones para cada evento, es decir, para cada interacción de un muon, formó una distribución de Landau como se muestra en la Figura 2.2.

A cada uno de los eventos les hicimos un ajuste de Landau usando un programa hecho en C++ ejecutado en el framework ROOT. Este ajuste se eligió hacer solo en una parte de la

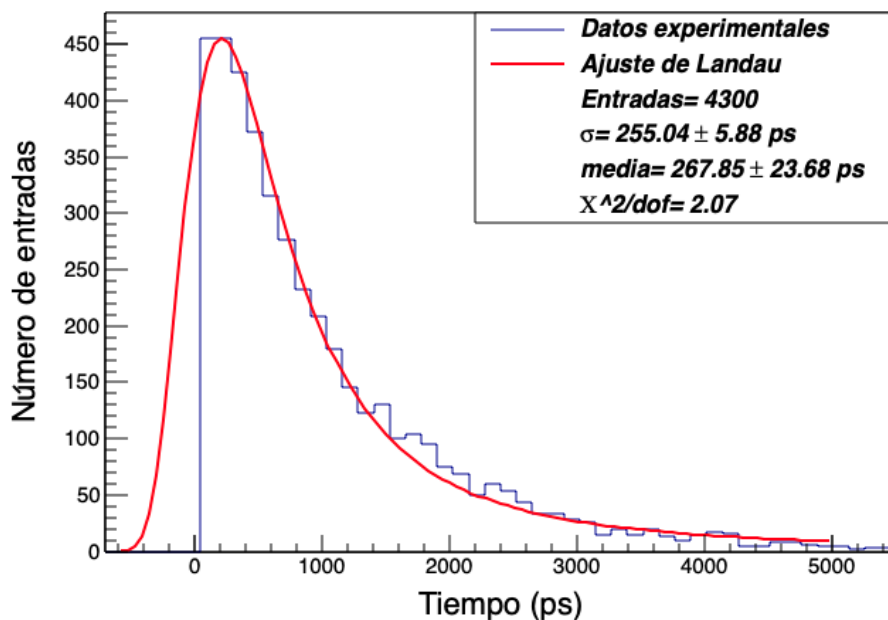


Figura 2.2. Ejemplo de ajuste de Landau (color rojo) hecho para la distribución generada por el evento 883 (color azul), para la celda 0 con el SiPM en el centro y la incidencia del muon en el centro de la celda.

distribución de llegada de los fotones, ya que estos son considerados los más probables en arribar al SiPM y tomamos el valor medio del ajuste de Landau por cada evento. Para cada caso se hicieron entre 8 a 10 ajustes de eventos escogidos de forma arbitraria para visualizar el ajuste más óptimo a la distribución de Landau.

Con el conjunto de valores de las medias del ajuste registrados en un archivo de salida hicimos un histograma y se obtuvo una distribución de Gauss, a la cual le aplicamos un ajuste gaussiano. Además, se le agregó una condición al programa del ajuste de Gauss para tomar los eventos con un error menor al 20% y con media mayor a cero. Entonces, extrajimos la desviación estándar  $\sigma$  de la media del ajuste de Gauss. Debido a que la variación del tiempo de llegada de los fotones al Scorer es la resolución temporal intrínseca.

Por otro lado, fue necesario hacer un ajuste de Gauss múltiple a casi todas las distribuciones provenientes de los casos con interacción aleatoria de los muones en toda la cara de la celda como se muestra en los ejemplos de la Figura 2.3.

#### ***2.4. Cálculo de la eficiencia***

Por último, de los archivos generados en las simulaciones y por medio de programas hechos en C++ se extrajeron el número de fotones detectados y el número de fotones creados, con estos valores calculamos la eficiencia para cada configuración. Esto nos permitió estudiar en cual configuración hay una mejor recolección de fotones.

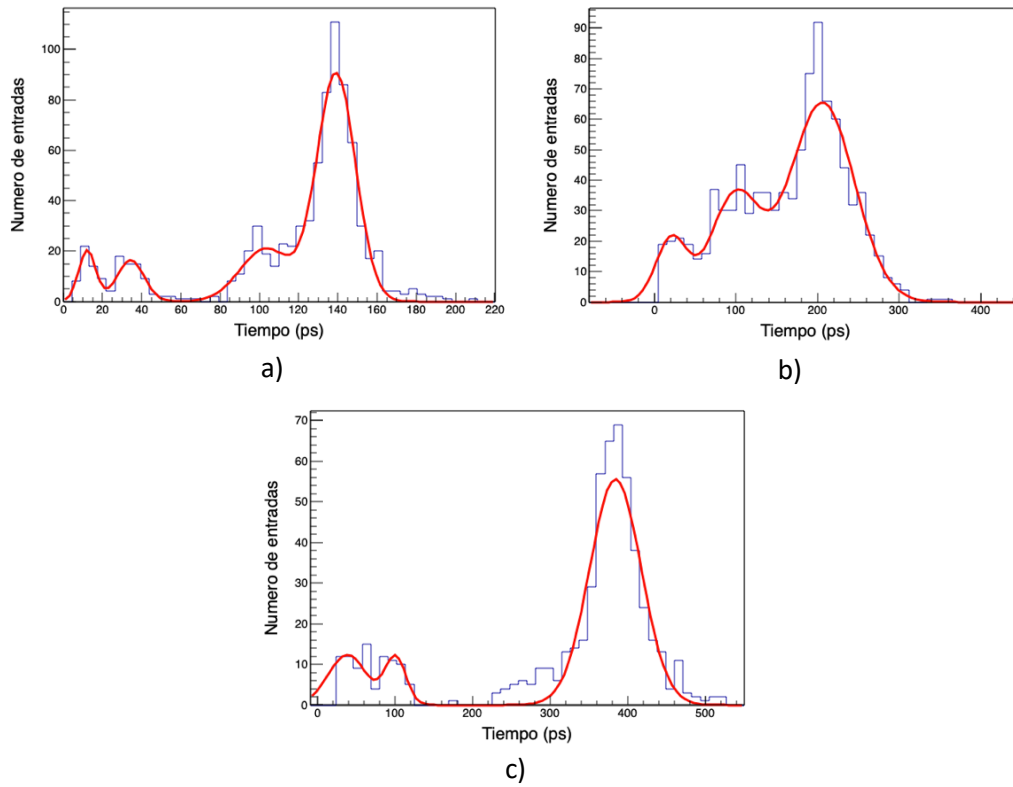


Figura 2.3. Ejemplos de ajuste (en color rojo) a las distribuciones de Gauss (en color azul) para el caso de interacciones aleatorias de los muones en toda la cara de la celda. Con el SiPM a) en el centro y b) en la esquina de la celda 0 en el anillo 0, los valores de la media y  $\sigma$  se muestran en la Tabla 3.1. Para el SiPM c) en el centro de la celda 33 en el anillo 2, los valores de la media y  $\sigma$  se muestran en la Tabla 3.2.



# Capítulo 3

## Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los valores obtenidos para la resolución temporal intrínseca, la media del tiempo de vuelo promedio, y la eficiencia para cada una de las configuraciones de las celdas 0, 33 y 65, ya que estos son los valores de interés para el presente trabajo.

En general para las distribuciones de los casos con interacción de muones en el centro o en la esquina superior de la celda obtuvimos una distribución de Gauss tal como se muestra en la Figura 3.1a, b y la Figura 3.2a, b. Los ajustes restantes a la distribución de Gauss para las distintas configuraciones de las celdas 0, 33 y 65 se muestran en el Apéndice A.

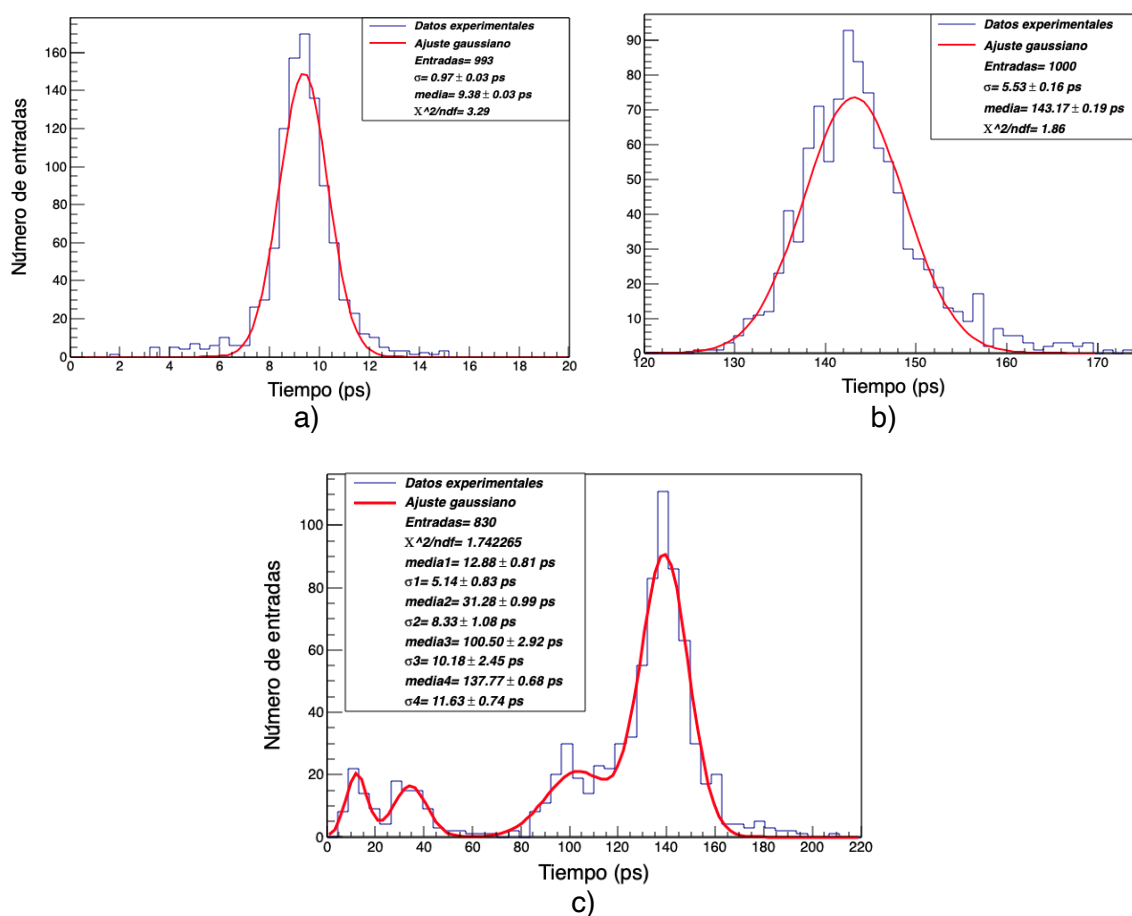


Figura 3.1. Ajustes (en color rojo) a la distribución de Gauss (en color azul) para la configuración con el SiPM en el centro e interacciones de los muones a) en el centro, b) en la esquina, c) aleatorias en toda la cara de la celda 0 en el anillo 0.

Mientras que las distribuciones generadas del caso con incidencia aleatoria de los muones en toda la cara de la celda se obtuvieron distintas distribuciones de Gauss como se ve, por ejemplo, en la Figura 3.1c y la Figura 3.2c.

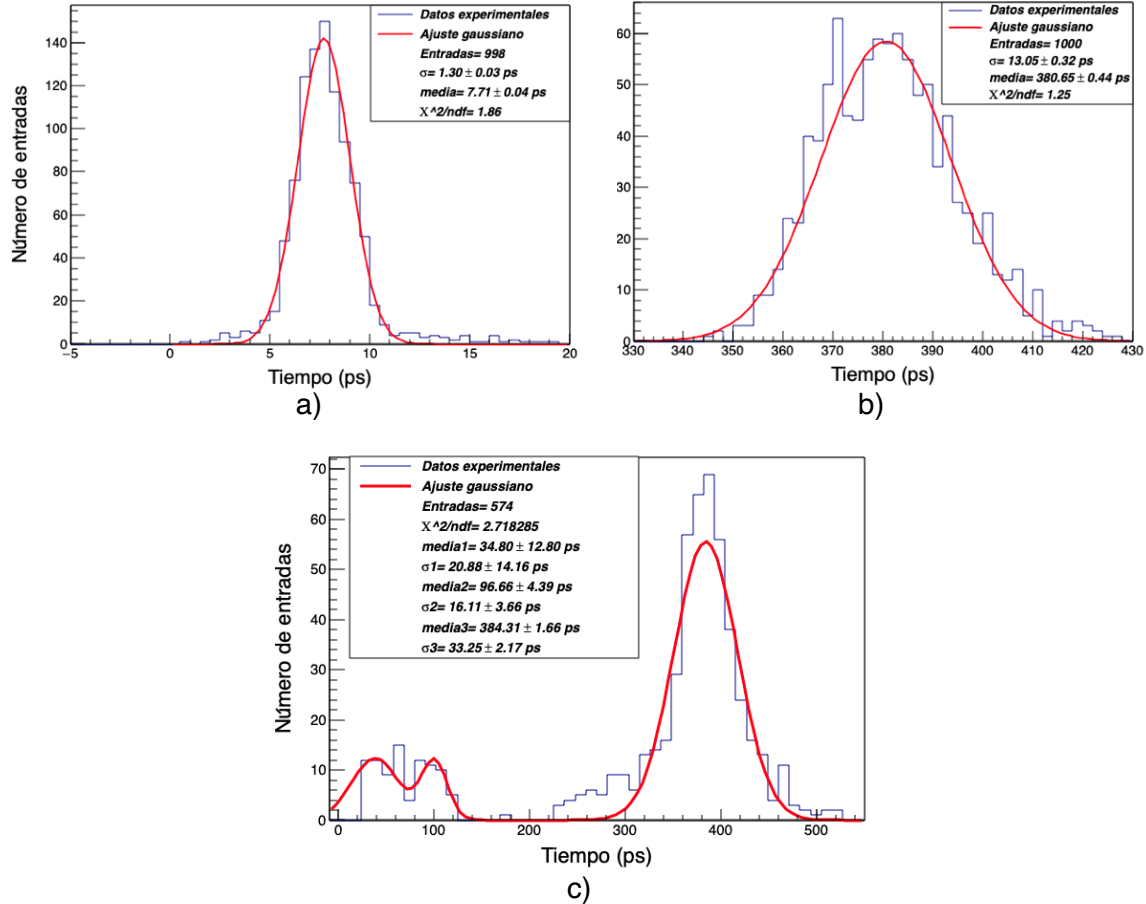


Figura 3.2. Ajustes (en color rojo) a la distribución de Gauss (en color azul) para la configuración con el SiPM en el centro e interacciones de los muones a) en el centro, b) en la esquina, c) aleatorias en toda la cara de la celda 33 en el anillo 2.

A continuación, los resultados de las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 fueron abordados de la siguiente forma: primero la relación entre la misma ubicación (en el centro o en la esquina de la celda) para el SiPM y la incidencia de los muones, después la relación entre los valores obtenidos con distinta ubicación del SiPM e interacciones, y finalmente el caso de incidencia aleatoria en toda la cara de la celda con el SiPM en el centro o en la esquina de la celda.

### 3.1 Media y $\sigma$ de las configuraciones en la celda 0

Para la configuración de la celda 0 anillo 0 con el SiPM en el centro o en la esquina, e interacción de los muones de los casos 1, 2 y 3 los valores para la media y  $\sigma$  se muestran en la Tabla 3.1. Cuando la incidencia de los muones fue en el centro (caso 1) y con el SiPM en el centro de la celda los valores de la media y  $\sigma$  resultaron los más bajos, es decir, los fotones

tienen un tiempo de vuelo menor y por lo tanto su resolución temporal es baja, en contraste con el SiPM en el centro e interacción de los muones en la esquina. De forma similar, para las interacciones de muones en la esquina (caso 2) y con el SiPM en la esquina la resolución temporal y la media tienen el valor más pequeño en comparación con el SiPM en la esquina e interacción de los muones en el centro de la celda. Esta relación muestra que para el SiPM y la interacción de los muones en la misma ubicación tienen los valores más bajos de resolución temporal. Aun así, la configuración SiPM centro con interacciones en el centro es la de menor media y resolución temporal. La configuración SiPM centro e interacciones en la esquina tiene una media mayor que con el SiPM en la esquina e interacciones en el centro, pero la resolución temporal intrínseca es menor con el SiPM centro e interacciones esquina. Se puede notar que cuando el SiPM está en el centro para el caso 1 o 2 de las interacciones la resolución temporal tiene los valores más bajos. Por otro lado, para la incidencia aleatoria de muones en toda la cara de la celda (caso 3) se obtuvieron distintos valores crecientes de  $\sigma$  y la media como se puede ver, por ejemplo, en la Figura 3.1c en donde el primer y cuarto pico serían las interacciones en el centro y en la esquina, respectivamente. Para el caso 3 con el SiPM en el centro o en la esquina estos valores se aproximan a los valores de las configuraciones en donde el SiPM y las interacciones de los muones tienen distinta ubicación en la celda, por lo que el caso 3 contiene a los casos 1 y 2. Es decir, en general el caso aleatorio es el promedio todos los puntos de interacción de los muones, por lo que se generan distintos picos en las distribuciones. Además, la configuración con el SiPM en el centro es la que tiene valores de la resolución temporal menores que con el SiPM en la esquina para la interacción aleatoria de los muones. Este patrón se repite de manera similar para la celda 33 ubicada en el anillo 2 y la celda 65 ubicada en el anillo 4.

**Tabla 3.1. Media y  $\sigma$  de los ajustes de Gauss para la distribución obtenida de los datos de la simulación de la celda 0 en el anillo 0.**

Hits SiPM	Centro (caso 1)	Esquina (caso 2)	Aleatorio (caso 3)
<b>Centro</b>	$\sigma = 0.97 \pm 0.03$ ps media = $9.38 \pm 0.03$ ps	$\sigma = 5.53 \pm 0.16$ ps media = $143.17 \pm 0.19$ ps	$\sigma_1 = 5.14 \pm 0.83$ ps media1 = $12.88 \pm 0.81$ ps  $\sigma_2 = 8.33 \pm 1.08$ ps media2 = $31.28 \pm 0.99$ ps  $\sigma_3 = 10.18 \pm 2.45$ ps media3 = $100.50 \pm 2.92$ ps  $\sigma_4 = 11.63 \pm 0.74$ ps media4 = $137.77 \pm 0.68$ ps
<b>Esquina</b>	$\sigma = 8.72 \pm 0.26$ ps media = $136.19 \pm 0.30$ ps	$\sigma = 3.03 \pm 0.10$ ps media = $17.23 \pm 0.11$ ps	$\sigma_1 = 30.47 \pm 7.20$ ps media1 = $25.64 \pm 5.87$ ps  $\sigma_2 = 49.03 \pm 4.74$ ps media2 = $116.25 \pm 4.52$ ps  $\sigma_3 = 39.10 \pm 2.57$ ps media3 = $205.73 \pm 2.81$ ps

### 3.2 Media y $\sigma$ de las configuraciones en la celda 33

Para la celda 33 con SiPM e interacción de muones en la misma ubicación, la configuración en la esquina (SiPM e interacciones) es la que tiene el menor valor de resolución temporal, pero su media es mayor que la configuración en el centro (SiPM e interacciones). Es decir, aunque su tiempo de llegada es mayor los fotones ópticos son detectados más rápido por el SiPM en la esquina con interacciones de los muones en la esquina. Además, las configuraciones con ubicación diferente del SiPM e interacciones tienen valores aproximados de la resolución temporal, aunque es un poco más pequeña para el SiPM centro con interacciones en la esquina. Sin embargo, la media es menor para el SiPM en la esquina con interacciones en el centro. Nuevamente el caso 3 con SiPM en centro o en la esquina contiene a los casos 1 y 2 como se ve por ejemplo en la Figura 3.2c, ya que los valores máximos de  $\sigma$  y la media son aproximados al caso con interacciones aleatorias. Sin embargo, la configuración con el SiPM en el centro contiene valores de la resolución temporal menores que con el SiPM en la esquina para el caso 3. Todos los resultados están contenidos en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Media y  $\sigma$  de los ajustes de Gauss para la distribución obtenida de los datos de la simulación de la celda 33 en el anillo 2.**

Hits SiPM	Centro (caso 1)	Esquina (caso 2)	Aleatorio (caso 3)
<b>Centro</b>	$\sigma = 1.30 \pm 0.03$ ps media = $7.72 \pm 0.04$ ps	$\sigma = 13.05 \pm 0.32$ ps media = $380.65 \pm 0.44$ ps	$\sigma_1 = 20.88 \pm 14.16$ ps media1 = $34.80 \pm 12.80$ ps  $\sigma_2 = 16.11 \pm 3.67$ ps media2 = $96.66 \pm 4.39$ ps  $\sigma_3 = 33.26 \pm 2.17$ ps media3 = $384.31 \pm 1.66$ ps
<b>Esquina</b>	$\sigma = 13.60 \pm 0.39$ ps media = $367.35 \pm 0.46$ ps	$\sigma = 0.85 \pm 0.03$ ps media = $9.95 \pm 0.03$ ps	$\sigma_1 = 34.05 \pm 3.05$ ps media1 = $87.30 \pm 3.97$ ps  $\sigma_2 = 153.83 \pm 12.92$ ps media2 = $345 \pm 12.97$ ps  $\sigma_3 = 72.07 \pm 5.19$ ps media3 = $560.71 \pm 6.57$ ps

### 3.3 Media y $\sigma$ de las configuraciones en la celda 65

Similar a lo antes mencionado, con el SiPM y la interacción ubicados en la esquina la resolución temporal resulta la más baja para la celda 65 en el anillo 4, pero media mayor que con el SiPM en el centro e interacción en el centro de la celda. También, las configuraciones con ubicación distinta resultan aproximadas, pero para las interacciones en la esquina y SiPM en el centro la resolución temporal y media son más bajas que el caso con interacciones en el centro y SiPM en la esquina. Para el caso 3 de las interacciones con el SiPM en la esquina tienen distintos valores ascendentes de resolución temporal y media que son aproximados a

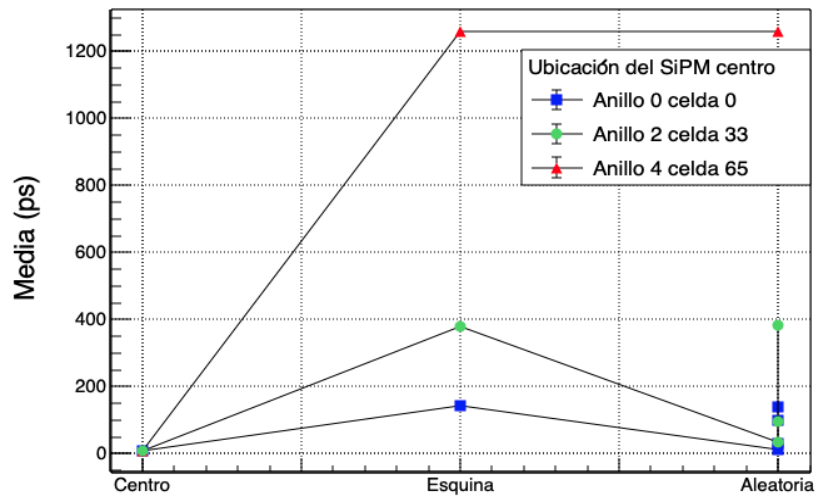
los del SiPM en la esquina para los casos 1 y 2. Mientras que para el caso de incidencia aleatoria y SiPM en el centro obtuve un único valor de  $\sigma$  y media, pero aún así estos valores siguen aproximándose a los valores máximos con el SiPM en el centro del caso 1 y 2. Indicando de la misma manera que el caso de incidencia aleatoria contiene a los casos 1 y 2 para cualquiera de las dos posiciones del SiPM. Todos los resultados mencionados se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Media y  $\sigma$  de los ajustes de Gauss para la distribución obtenida de los datos de la simulación de la celda 65 en el anillo 4.**

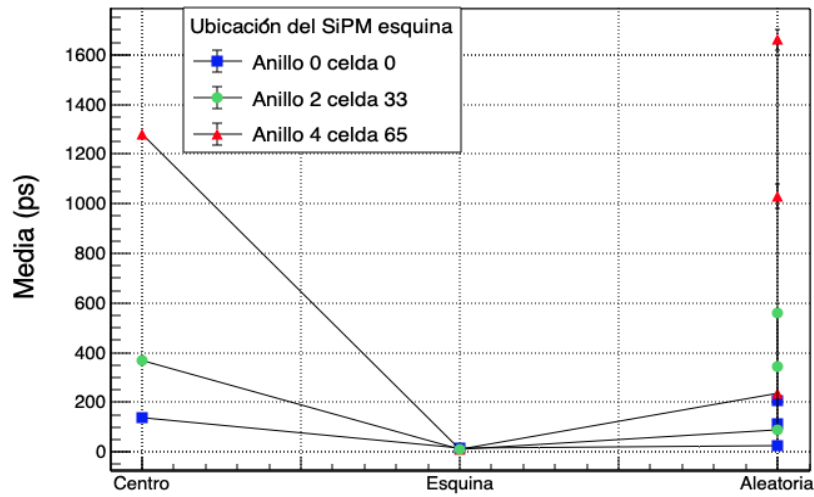
Hits \ SiPM	Centro (caso 1)	Esquina (caso 2)	Aleatorio (caso 3)
Centro	$\sigma = 1.84 \pm 0.05$ ps media = $8.27 \pm 0.07$ ps	$\sigma = 72.92 \pm 2.20$ ps media = $1258.36 \pm 2.67$ ps	$\sigma_1 = 82.53 \pm 2.83$ ps media1 = $1260.73 \pm 3.24$ ps
Esquina	$\sigma = 85.86 \pm 2.63$ ps media = $1280.31 \pm 3.42$ ps	$\sigma = 0.88 \pm 0.03$ ps media = $9.98 \pm 0.03$ ps	$\sigma_1 = 71.24 \pm 23.40$ ps media1 = $237.70 \pm 15.09$ ps  $\sigma_2 = 421.98 \pm 52.53$ ps media2 = $1029.88 \pm 48.20$ ps  $\sigma_3 = 330.44 \pm 25.51$ ps media3 = $1660.85 \pm 42.24$ ps

### 3.4 Tiempo medio de llegada en función de la posición

La Figura 3.3a compara los valores extraídos de la media en función de la ubicación de la interacción de los muones (casos 1, 2 y 3) para la configuración con el SiPM en el centro de la celda. En la Figura 3.3b también se grafican los valores extraídos de la media contra la ubicación de la interacción de los muones (casos 1, 2 y 3) pero para la configuración con el SiPM en la esquina de la celda. En ambas figuras los resultados para la celda 0 son los cuadrados en color azul, para la celda 33 son círculos en color verde y para la celda 65 son los triángulos en color rojo. Las líneas negras que unen los datos simplemente muestran la relación ascendente o descendente entre los valores de las medias. Como se puede apreciar en la Figura 3.3 a y b la media tiende a tener el menor valor cuando el SiPM y los casos 1 y 2 de las interacciones están ubicados en el mismo lugar de la celda, esto es, para el SiPM e interacciones en el centro o SiPM e interacciones en la esquina, el tiempo medio de llegada de los fotones es bajo dado que su camino óptico es pequeño. Por lo que los fotones son detectados con mayor rapidez. Esto se ve reflejado en los casos aleatorios de incidencia de los muones. Por ejemplo, véase la configuración de la celda 0 anillo 0 (cuadrados en color azul) con el SiPM en el centro en donde los valores de la interacción en el centro y en la esquina están aproximadamente dentro del rango de valores de la interacción aleatoria de los muones, lo que muestra claramente que el caso 3 es el promedio de todos los puntos interacción, y los ejemplos de esta convolución se observan también en la Figura 3.1c y 3.2c.



a)



Interacción de los muones

b)

Figura 3.3. Gráficas de la media del conjunto de las medias del ajuste de Landau contra la ubicación de las interacciones en la celda 0, 33 y 65, a) con el SiPM en centro de la celda y b) con el SiPM en la esquina superior de la celda.

Esto ocurre del mismo modo para los valores de la media de la celda 33 y 65. Además, se puede ver que conforme la celda va cambiando de posición en los anillos el tiempo de vuelo incrementa su valor y tarda más en detectar el arribo de los fotones, es decir, la resolución temporal se va incrementando. Asimismo, al comparar los valores de la Figura 3.3a con respecto a la 3.3b la media con el SiPM en el centro siempre es menor que con el SiPM en la esquina para la interacción aleatoria de los muones.

### 3.5 Resolución temporal intrínseca en función de la posición

En la Figura 3.4 a y b graficamos los valores de la resolución temporal intrínseca contra la ubicación de la interacción de los muones en la celda. La Figura 3.4a es para la configuración

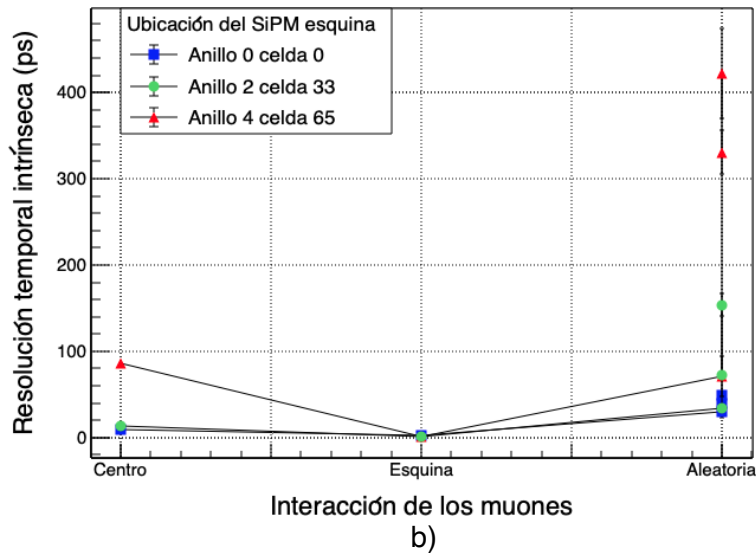
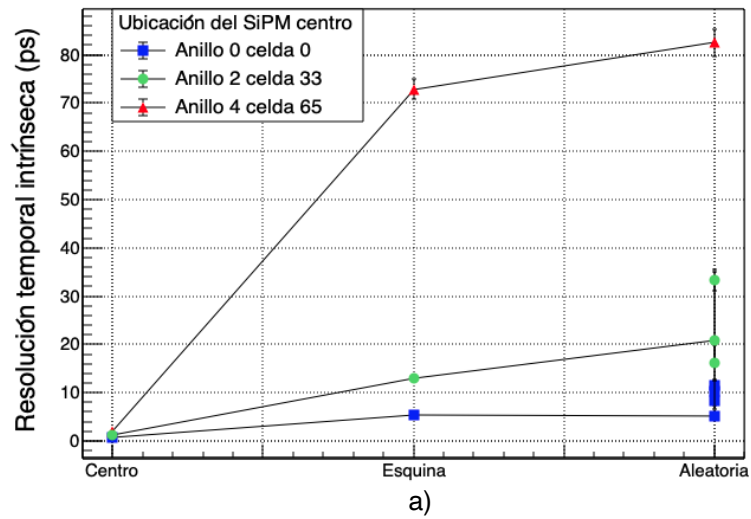


Figura 3.4. Gráficas de la resolución temporal intrínseca contra la ubicación de las interacciones en la celda 0, 33 y 65, a) con el SiPM en centro de la celda y b) con el SiPM en la esquina superior de la celda.

con el SiPM en el centro de la celda, mientras que la 3.4b es para la configuración con el SiPM en la esquina. En ambas figuras los resultados para la celda 0 son los cuadrados en color azul, para la celda 33 son los círculos en color verde y para la celda 65 son los triángulos en color rojo y las líneas negras que unen los datos simplemente muestran la relación ascendente o descendente entre los valores de  $\sigma$ . De la misma forma los puntos de interacción de los muones con la misma ubicación que el SiPM tienen los valores más pequeños. Es decir, los fotones son detectados por el SiPM con mayor rapidez para el SiPM e incidencia de los muones en la misma ubicación. Además, para la incidencia aleatoria de muones es claro que conforme la celda cambia su posición en los anillos la resolución temporal aumenta su magnitud. También el rango de valores para el caso aleatorio de interacciones es mayor

con el SiPM en la esquina en comparación con el SiPM en el centro, esto se debe a que longitud de camino óptico para los fotones es mayor cuando el SiPM está en la esquina, por la geometría y las dimensiones de la celda.

### 3.6 Cálculo de la eficiencia

Por último, calculamos los valores para la eficiencia los cuales se muestran en la Tabla 3.4. Como se puede notar el valor máximo lo tiene la configuración con el SiPM y las interacciones en la esquina de la celda 0 en el anillo 0. Este patrón se mantiene para las celdas 33 y 65, en donde los valores de la eficiencia son mayores con SiPM e interacciones en la esquina en comparación con el SiPM e interacciones en el centro de la celda, esto se ve claramente en la Figura 3.5b al compararla con la Figura 3.5a. En ambas figuras fue graficada la eficiencia contra las distintas ubicaciones de incidencia de los muones, pero la Figura 3.5a compara los valores de la eficiencia de las celdas 0 (cuadrados en color azul), 33 (cuadrados en color verde) y 65 (cuadrados en color rojo) con el SiPM en el centro. Mientras que la Figura 3.5b compara los valores con el SiPM en la esquina.

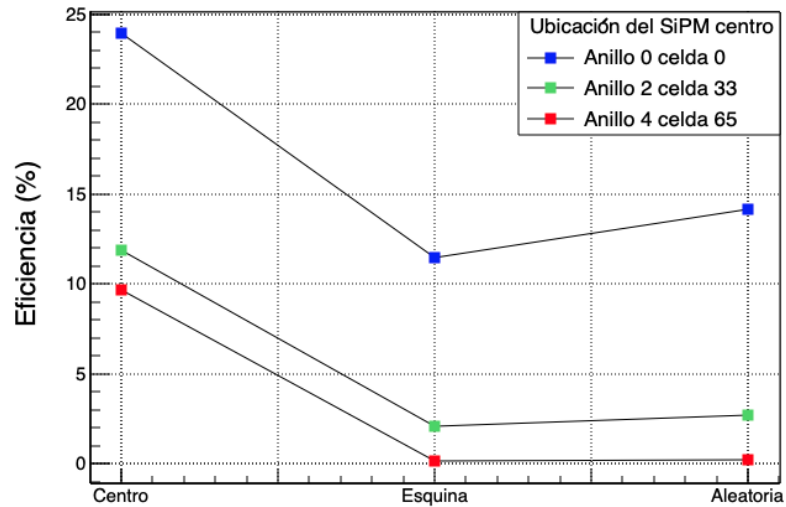
**Tabla 3.4. Eficiencia de las distintas configuraciones para las celdas 0, 33 y 65.**

Celda	Hits	Centro	Esquina	Aleatorio
	SiPM			
0	Centro	23.96 %	11.44 %	14.18%
	Esquina	12.20 %	27.79 %	13.56 %
33	Centro	11.91 %	2.09 %	2.74 %
	Esquina	2.09 %	14.93 %	2.57 %
65	Centro	9.67 %	0.15 %	0.26 %
	Esquina	0.15 %	11.15 %	0.22 %

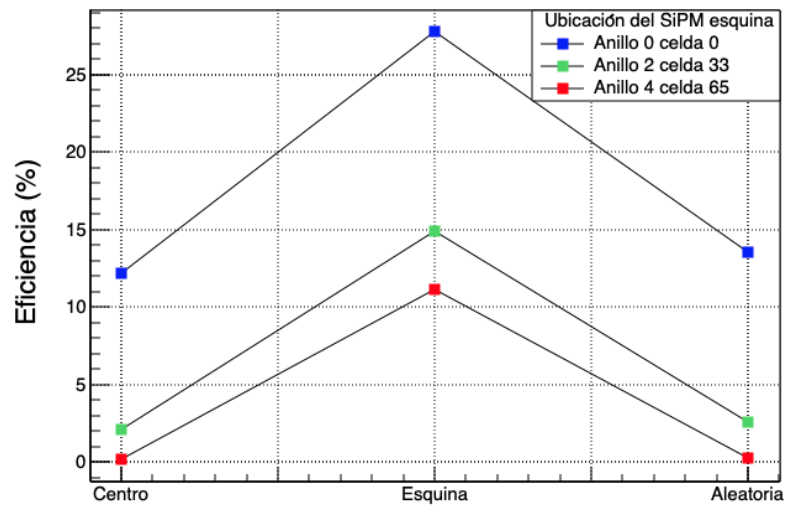
Por otra parte, las configuraciones con el SiPM y la interacción en distinta ubicación tienen valores aproximados de la eficiencia para la celda 0, iguales para la celda 33 y para la celda 65 los valores de la eficiencia fueron iguales tal como se ve en la Tabla 3.4. También se puede notar que, para la incidencia aleatoria de los muones, aunque la eficiencia tiende a ser casi igual para ambas posiciones del SiPM, la configuración con el SiPM en el centro es un poco más grande que con el SiPM en la esquina de la celda. Es decir, de los fotones creados por las interacciones aleatorias de los muones, el SiPM en el centro de la celda detecta un porcentaje ligeramente mayor de fotones en comparación con el SiPM en la esquina de la celda.

En la Figura 3.5a, b se puede apreciar que la celda 0 es en general la de mayor eficiencia para cualquiera de sus configuraciones. Después le sigue la celda 33, y la de menor eficiencia fue la celda 65. Esto se debe a que el tamaño de las celdas aumenta, por lo que muchos de los

fotones creados en la interacción del muon con el plástico centellador son absorbidos entonces no alcanzan a ser detectados por el SiPM.



a)



b)

Figura 3.5. Gráficas de la eficiencia contra la interacción de los muones para el SiPM a) en centro y b) en la esquina de la celda 0, 33 y 65.



# Conclusiones y discusión

El rango aproximado de la resolución temporal intrínseca para la celda 0 con el Scorer en el centro fue entre 5 y 11 ps con una media 12 y 137 ps, mientras que para el Scorer en la esquina fue entre 30 y 39 ps para  $\sigma$ , con media entre 25 y 205 ps. Para la celda 33 con el Scorer en el centro tuvo una  $\sigma$  aproximada entre 20 y 33 ps, y media entre 34 y 384 ps; pero con el Scorer en la esquina tuvo una  $\sigma$  en el rango entre 34 y 72 ps, y media entre 87 y 560 ps. Para la celda 65 con el Scorer en el centro con aproximadamente 82 ps de resolución temporal intrínseca y media 1260 ps. Mientras que con el Scorer en la esquina una  $\sigma$  en un rango aproximado entre 71 y 330 ps, y media entre 237 y 1660 ps. Esto mostró que los valores van creciendo conforme las dimensiones de las celdas aumentan y que los casos con incidencia aleatoria de muones y ubicación del Scorer en el centro de la celda son los que tienen la mejor resolución temporal intrínseca para las celdas 0, 33 y 65.

Caracterizar los puntos de interacción de los muones en la esquina y en el centro nos permitió exponer como la resolución temporal intrínseca está en función del punto de interacción. Esto es evidente en las configuraciones con las interacciones de los muones y el Scorer en la misma ubicación en la celda, en donde se estimaron los valores más pequeños de  $\sigma$ . Además, las configuraciones con las interacciones y el Scorer en distinta ubicación tienen en general valores aproximados de la resolución temporal intrínseca y la media, este comportamiento se nota más claro para las celdas 33 y 65.

Por otro lado, los casos aleatorios de interacción de los muones al ser promedio de todos los puntos de interacción manifiestan que los tiempos de llegada están cuantizados, esto se pudo apreciar en sus distribuciones con distintas gaussianas.

La mayor eficiencia fue alcanzada por las interacciones y Scorer en la esquina para las celdas 0, 33 y 65, que a la par es la que tiene el tiempo de detección más bajo para esa configuración de la incidencia de los muones y el Scorer, aunque con un mayor tiempo de llegada, en contraste con el Scorer e interacciones de los muones en el centro de la celda.

En particular la celda 0 con el Scorer en el centro e interacciones aleatorias de los muones es la que tiene mayor eficiencia en comparación con las demás configuraciones de los casos de incidencia aleatoria. Pero, en general en las celdas 0, 33 y 65 la eficiencia fue mayor para el caso aleatorio de interacciones con el Scorer en el centro en oposición con el Scorer en la esquina de la celda, aunque esta diferencia no es significativa. De tal forma que ambas configuraciones (Scorer centro o esquina) detectan un porcentaje similar del total de fotones creados para el caso de incidencia aleatoria de los muones. También se concluye que la eficiencia está en función de los puntos de interacción, y a su vez la resolución temporal intrínseca depende de la recolección de fotones. Ya que como se mostró el caso con incidencia aleatoria y el Scorer en el centro es el que tiene mejor resolución temporal

intrínseca, pese a tener una eficiencia similar a la del Scorer en la esquina. También el caso con las interacciones de los muones y el Scorer en la esquina de la celda mantiene esta relación entre eficiencia y resolución temporal.

La eficiencia máxima alcanzada para la configuración con el Scorer en el centro e incidencia aleatoria resulta pequeña si lo comparamos con el Scorer e incidencia en la esquina de la celda 0, con la cual se obtuvo la mayor recolección de fotones. Tal como fue realizado por C. H. Zepeda [10], se podría hacer un estudio similar aumentando el número de los Scorer en las celdas para los mismos anillos como una forma de aumentar el área efectiva. Se pondría uno o más Scorer en la esquina superior izquierda y derecha, y en el centro de la celda, cubriendo así los puntos de interacción más alejados del centro de la celda conforme el arco de la misma crece. Por ejemplo, para la celda 0 sería suficiente con probar con 3 Scorer en las disposiciones antes mencionadas, pero para la celda 33 y 65 se podrían poner distintos Scorer alejados entre sí en una zona central y en la esquina superior con el objetivo de mostrar si hay una mejora significativa de la eficiencia y la resolución temporal intrínseca.

# Bibliografía

- [1] V. Golovatyuk, V. Kekelidze, V. Kolesnikov, et. al. “The Multi-Purpose Detector (MPD) of the collider experiment”, *Our. Phys. J.* A52 (2016) 212.
- [2] <https://nica.jinr.ru/complex.php>
- [3] <https://nica.jinr.ru/projects/mpd.php>
- [4] M. Alvarado et al., “A beam-beam monitoring detector for the MPD experiment at NICA,” arXiv, 2018, doi: 10.1016/j.nima.2019.163150.
- [5] M. Rodríguez Cahuantzi, “MEXnICA, Mexican group in the MPD-NICA experiment at JINR,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 912, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/912/1/012016.
- [6] B. Mohanty and N. Xu. “QCD Critical Point and High Baryon Density Matter” arXiv:2101.09210v1 [nucl-ex] 22 Jan 2021.
- [7] Leo, William R. (1994). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (2nd ed.). Springer. doi:10.1007/978-3-642-57920-2
- [8] <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/plastic-scintillators>
- [9] <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf>
- [10] C. H. Zepeda, “Time Resolution Simulation Measurement for the Configuration Plastic Scintillator Material+SiPM and its Application to Medical Physics,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1540, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1540/1/012031.
- [11] S. Agostinelli *et al.*, “GEANT4 - A simulation toolkit,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 506, no. 3, pp. 250–303, 2003, doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

# Apéndice

## Apéndice A: Ajustes a la distribución de Gauss para las distintas configuraciones de las celdas 0, 33 y 65.

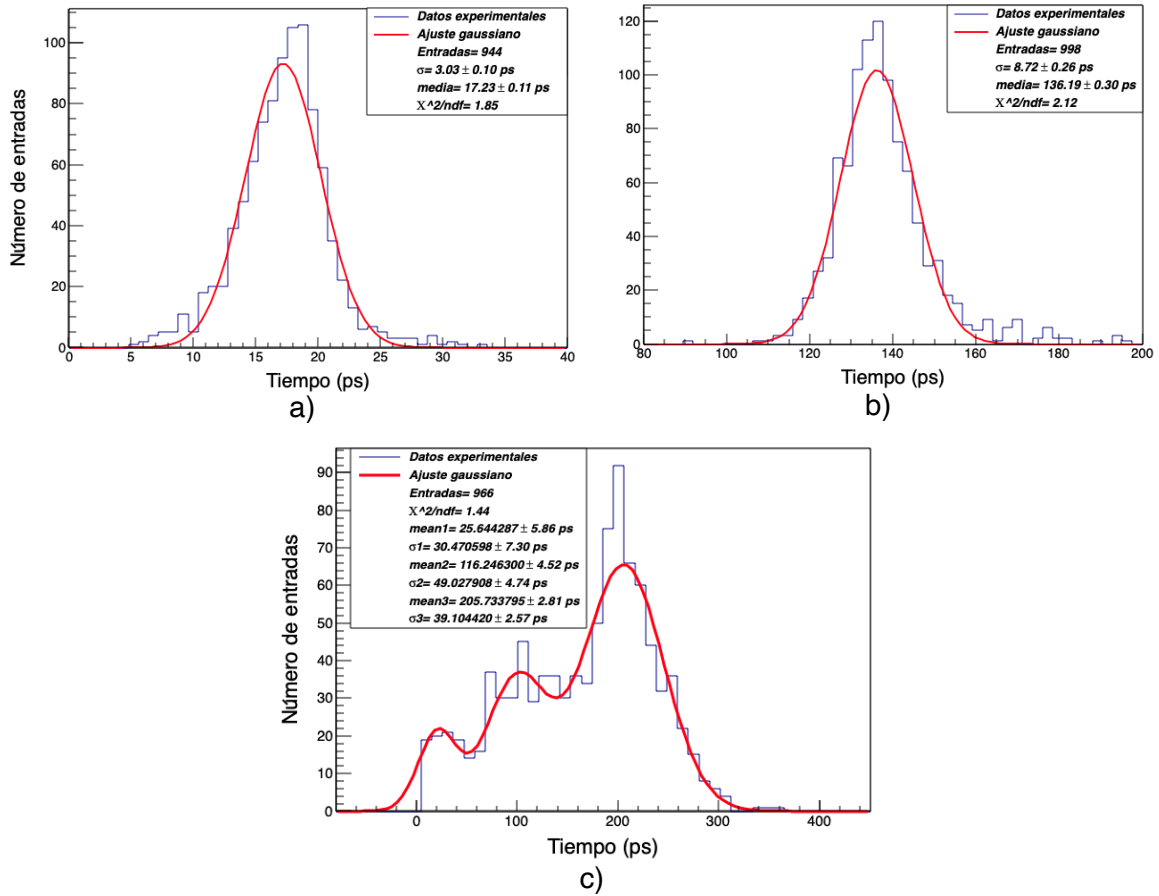


Figura A.1. Ajustes (en color rojo) a la distribución de Gauss (en color azul) para la configuración con el SiPM en la esquina e interacciones de los muones a) en la esquina, b) en el centro, c) aleatorias en toda la cara de la celda 0 en el anillo 0.

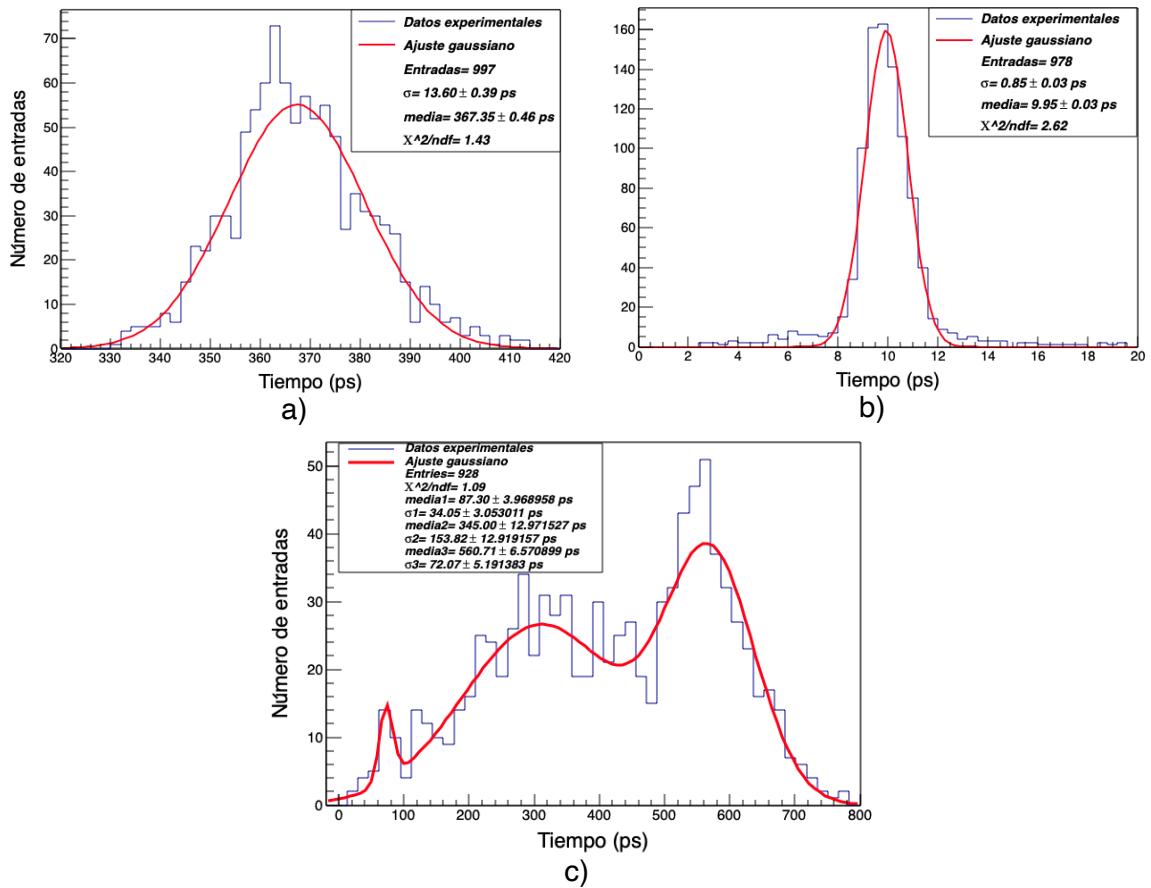


Figura A.2. Ajustes (en color rojo) a la distribución de Gauss (en color azul) para la configuración con el SiPM en la esquina e interacciones de los muones a) en el centro, b) en la esquina, c) aleatorias en toda la cara de la celda 33 en el anillo 2.

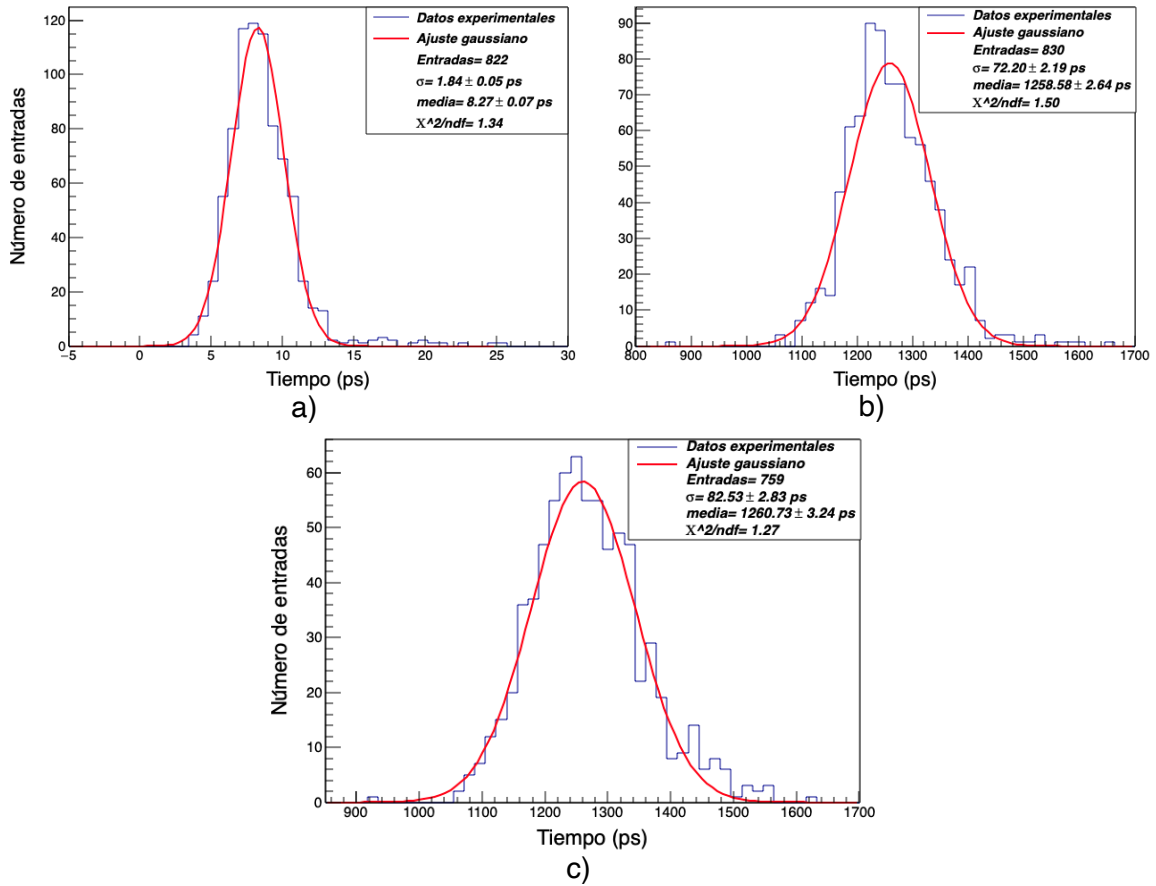


Figura A.3. Ajustes (en color rojo) a la distribución de Gauss (en color azul) para la configuración con el SiPM en el centro e interacciones de los muones a) en el centro, b) en la esquina, c) aleatorias en toda la cara de la celda 65 en el anillo 4.

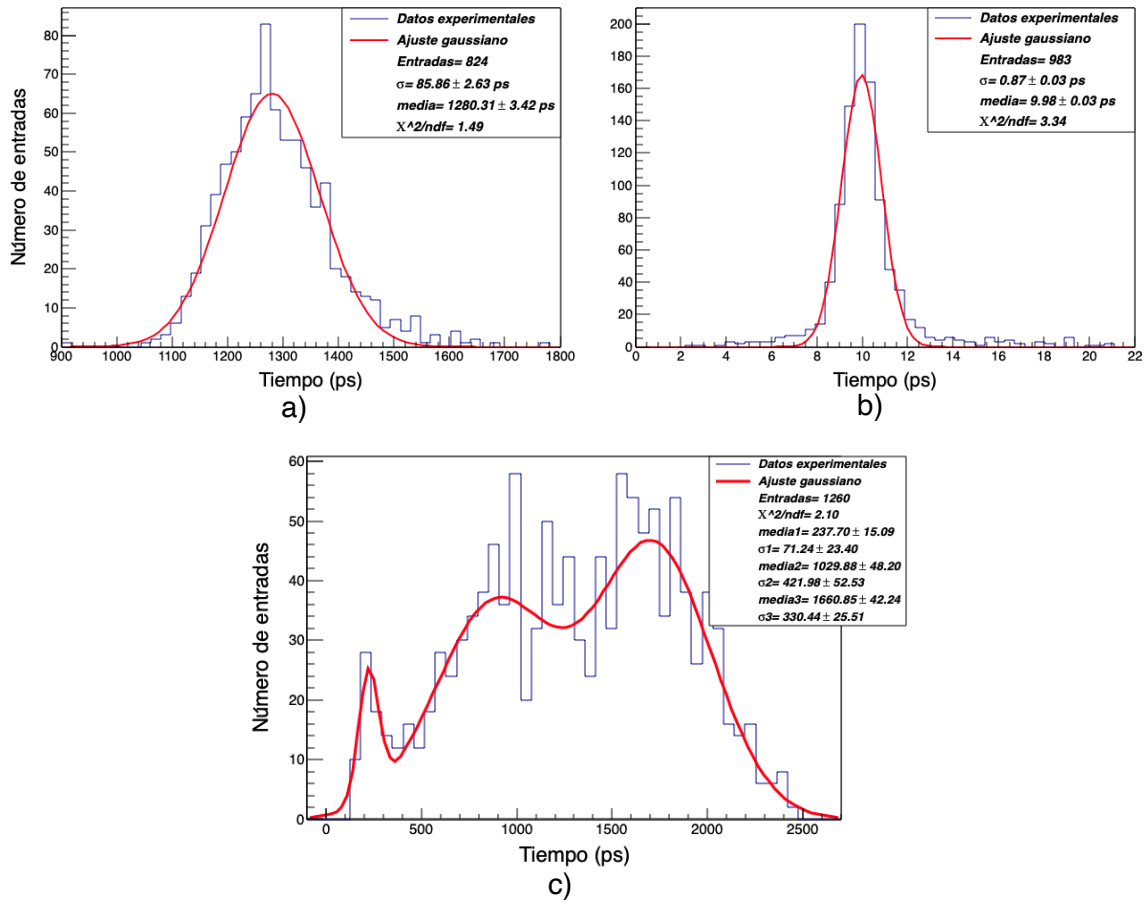


Figura A.4. Ajustes (en color rojo) a la distribución de Gauss (en color azul) para la configuración con el SiPM en la esquina e interacciones de los muones a) en el centro, b) en la esquina, c) aleatorias en toda la cara de la celda 65 en el anillo 4.