



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**

**Estudio Monte Carlo en GEANT4, para la caracterización de la
Resolución Temporal Intrínseca de detectores acoplados a
2 SiPMs en función del volumen de sus plásticos centelladores.**

Tesis presentada en 08/22 a la

**Facultad de Ciencias Físico-Matemático
y
al Cuerpo Académico de Física Médica**

como requisito parcial para la obtención del grado
de

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FÍSICA APLICADA

por

ING. FÍSICO JAVIER EFRÉN HERNÁNDEZ AGUILAR

ASESORADO POR

DR. CRISTIAN HEBER ZEPEDA FERNÁNDEZ

hzepeda@cfm.buap.mx

DR. EDUARDO BARBOSA MORENO

eduardo.morenoba@correo.buap.mx

Estudio Monte Carlo en GEANT4, para la caracterización de la Resolución Temporal Intrínseca de detectores acoplados a 2 SiPMs en función del volumen de sus plásticos centelladores.

Ing. Físico Javier Hernández Aguilar

Directores de tesis:

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández

y

Dr. Eduardo Moreno Barbosa

Miembros de comité tutorial:

Presidente: Dr. Javier Miguel Hernández López_____

Secretario: Dr. Mario Rodríguez Cahuantzi_____

Vocal: Dr. Rodolfo Martín Palomino Merino_____

©2021, Hernández Aguilar Javier Efrén.

Yo, Javier Efrén Hernández Aguilar, autorizo la reproducción total o parcial, con fines académicos o profesionales, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo las referencias de este documento, siempre y cuando se citen apropiadamente reconociendo los Derechos de Autor.

Declaración de Autenticidad “Yo, Javier Efrén Hernández Aguilar, declaro que el presente trabajo de titulación de posgrado en Física Aplicada es de mi autoría, y que los resultados obtenidos son auténticos, originales y procesados por su servidor. La información en este documento que proviene de distintas fuentes están debidamente citadas y referenciadas. Como autor asumo la responsabilidad legal, académica y profesional de los contenidos de este estudio.”

Puebla, Puebla de Zaragoza, 14 de junio de 2021.

Javier Efrén Hernández Aguilar _____

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma han hecho posible concluir el presente trabajo de titulación de posgrado. De manera especial a:

El Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández, asesor de Tesis por su exigencia, seguimiento, orientación y su apoyo incondicional, lo que hizo posible la realización y finalización del presente trabajo de titulación de grado de maestría. Muchas gracias por la guía y su confianza doctor.

El Dr. Eduardo Moreno Barbosa, también asesor de esta Tesis por su exigencia, seguimiento inflexibilidad y cuestionamientos, lo que permitió un detallado más meticuloso de los procesos conferidos en este estudio de posgrado.

A mis padres Javier Hernández y Mirna Aguilar, por brindarme la vida, su amor y comprensión intelectual, emocional y espiritual, pero sobre todo por otorgarme los valores necesarios para poder forjar mi casta y mis sueños, lo que me permitió con mucho esfuerzo y su apoyo finalizar mi licenciatura y ahora maestría; de verdad gracias por todo su apoyo material e inmaterial.

A Sharon Guerra por su amistad desde la infancia, su comprensión, su cariño, su amor, su apoyo, su continuidad en mi vida, su lógica y capacidad argumentativa, las cuales me acompañaron en la mayoría de días y noches en vela en la realización de este estudio. Gracias por ayudarme a ver más allá de la dualidad.

A mis amigos Giuseppe Verastegui, Oscar Tecuanhuey, Misael Pizaña, Eduardo Carrillo, Rolando y Osvaldo Velázquez, Jorge Hernández, Rafael Carreón, Salvador Robledo, Edmundo Márquez y Guillermo Castillo, gracias por acompañarme en esta pandemia tanto en estudio, como en momentos de relajación, entrenamiento, dicha y depresión que formaron parte de esta travesía a lo largo de la maestría tanto en el aula, en la biblioteca, en la naturaleza y vía online. Gracias por ayudarme a recordar que hay luz dentro de mí.

Gracias al Dr. Abel Flores y a la Dra. Adriana Martínez, profesores de la licenciatura, que me brindaron apoyo e inculcaron en mi: pasión, responsabilidad y serenidad más allá del ámbito académico desde los inicios de mi carrera profesional hasta la fecha.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por la oportunidad de realizar un estudio de posgrado en su institución y por tomar las medidas pertinentes durante esta pandemia, para tratar de salvaguardar a los estudiantes, a los miembros de los cuerpos académicos y personal administrativo en general.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por considerarme un candidato apto para recibir una beca durante los dos años que duro este estudio de posgrado.

Gracias a todos los que me acompañaron en este proceso de crecimiento y maduración intelectual y científica.

¡GRACIAS A LA DICHA DE VIVIR!

¡GRACIAS MÉXICO!

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Abstract	3
Motivación	4
1. Introducción	5
1.1. Conceptos básicos de radiación	7
1.1.1. Núcleo atómico	8
1.1.2. Isótopos	8
1.1.3. Decaimiento Radiactivo	9
1.2. Rayos Cósmicos	11
1.3. Fundamentos de Detección por Centelleo	13
1.4. Centelladores Orgánicos	14
1.5. Mecanismo para emisión de Luz	15
1.6. Respuesta de la Luz	18
1.7. Centelladores Plásticos	19
1.7.1 Centelladores BC-404 & BC-422.....	22
1.7.2. Material centellador BC-404.....	24
1.7.3. Material centellador BC-422.....	24
1.8. Fotodetectores	26
1.8.1. Tubos Fotomultiplicadores (PMTs)	26
1.8.2. Fotomultiplicadores de Silicio (SiPMs)	28
1.9 Resolución Temporal Intrínseca	31
2. Metodología	33
2.1 GEANT4.....	33
2.2 Metodología de la Simulaciones	33

3. Resultados y Análisis	41
3.1. Resultados para 2 Scores (2 SiPM) BC-404 vs BC-422	41
4. Discusión y conclusiones	53
Bibliografía	55
APÉNDICE A.:	
TABLAS DE RESOLUCIONES TEMPORALES (RT), 2 SCORES. BC-404 VS BC-422	61
Tabla A.1. RESOLUCIÓN TEMPORAL “BC-404 & BC-422, 2 SCORES”, HAZ DE MUONES DISTRIBUIDO ALEATORIAMENTE SOBRE EL CENTELLADOR.....	61
Tabla A.2. RESOLUCIÓN TEMPORAL “BC-404 & BC-422, 2 SCORES”, HAZ DE MUONES DIRIGIDO AL CENTRO DEL CENTELLADOR.....	61
Tabla A.3. RESOLUCIÓN TEMPORAL “BC-404 & BC-422, 2 SCORES”, HAZ DE MUONES DIRIGIDO A LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA DEL CENTELLADOR.....	61
APÉNDICE B.:	
TABLAS DE PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA(TOF), 2 SCORES. BC-404 VS BC-422	63
Tabla B.1. PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA DE LOS FOTONES "BC-404 & BC-422, 2 SCORES", HAZ DE MUONES DISTRIBUIDO ALEATORIAMENTE SOBRE EL CENTELLADOR.....	63
Tabla B.2. PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA DE LOS FOTONES "BC-404 & BC-422, 2 SCORES", HAZ DE MUONES DIRIGIDO AL CENTRO DEL CENTELLADOR.....	63
Tabla B.3. PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA DE LOS FOTONES "BC-404 & BC-422, 2 SCORES", HAZ DE MUONES DIRIGIDO A LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA DEL CENTELLADOR.....	63
APÉNDICE C. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF)	65
APÉNDICE C.1 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF), HAZ ALEATORIO (BC-404)..	65
APÉNDICE C.2 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF), HAZ ALEATORIO (BC-422)..	66
APÉNDICE C.3 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF), HAZ CENTRADO (BC-404)..	67
APÉNDICE C.4 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF), HAZ CENTRADO (BC-422).....	68
APÉNDICE C.5 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF), HAZ ESQUINADO (BC-404).....	69
APÉNDICE C.6 DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: (RT) Y (TOF), HAZ ESQUINADO (BC-422).....	70
APÉNDICE D. CÓDIGO EN C++ DEL SCRIPT “OpNoviceDetectorConstruction.cc”, COMPILADO EN GEANT4 PARA SIMULAR LA GEOMETRÍA DE LOS DETECTORES CON PLÁSTICOS CENTELLADORES (BC-404 & BC-422) ACOPLADOS A 2 SCORES	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades en común del plástico centellador BC-404 y BC-422 proveídos por Saint-Gobain Crystal®.....	23
Tabla 2. Propiedades de centelladores BC-404 y BC-422 proveídos por Saint-Gobain Crystals®.....	25
Tabla 3. Resolución temporal “BC-404 & BC-422, 2 scores”, haz de muones distribuido aleatoriamente sobre el centellador.....	47
Tabla 4. Resolución temporal “BC-404 & BC-422, 2 scores”, haz de muones dirigido a la esquina inferior izquierda del centellador.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la distribución del acelerador NICA.....	6
Figura 2. Equipo médico PET/CT GE Healthcare®	6
Figura 3. Equipo médico. XR/FR. Healthineers®.....	6
Figura 4. Equipo de microscopía de barrido electrónico (SEM) TESCAN®	6
Figura 5. Un diagrama de los componentes que constituyen el acoplamiento centellador-SiPM.....	7
Figura 6. Gráfica. Núcleos estables están mostrados en color azul, núcleos radiactivos conocidos son mostrados en color gris.....	9
Figura 7. Representación de una estructura cristalina de un elemento inorgánico arbitrario.....	14
Figura 8. Estructura molecular del Antraceno.....	15
Figura 9. Representación estructural de las moléculas del estilbena.....	15
Figura 10. Niveles de energía de una molécula orgánica con estructura de electrones π , representando fenómenos de fluorescencia y fosforescencia.....	16
Figura 11. Sentido del espín de los electrones en niveles energéticos singlete y triplete.....	17
Figura 12. Gráfica del rendimiento de la luz de centelleo para un centellador plástico común (<i>NE-102</i> cuando es excitado por protones y electrones.	28
Figura 13. Estructura molecular del poliestireno (C_8H_8) _n . Donde la “n” fuera de los corchetes significa que dicha estructura o monómero se encadena consigo mismo “n” veces a través de sus enlaces libres formando un polímero.....	20
Figura 14. Dos orbitales tipo “p” uniéndose y formando un orbital " π ".....	20
Figura 15. Estructura molecular del polímero <i>PVT</i> (poliviniltolueno).....	21
Figura 16. Estructura molecular cíclica triangular de los grupos epóxidos.....	21
Figura 17. Estructura molecular del monómero no aromático base que se utiliza para producir el plástico centellador polimetilmetacrilato “ <i>PMMA</i> ”.....	21

Figura 18. Estructura molecular base, no aromática, usada para producir el plástico centellador dimeticona “Polidimetilsiloxano o “PDMS”	21
Figura 19. Imagen representativa de las distintas formas geométricas en las que se manufacturan los plásticos centelladores basados en matrices de PVT y flúores.....	22
Figura 20. Diagrama de la transición molecular del monómero 4-Vinil-tolueno (izquierda) a polímero “ PVT “ a través de la ruptura del doble enlace del grupo vinilo (alqueno) y su consecuente polimerización.....	23
Figura 21. Gráfica de la curva del pico de emisión del centellador BC-404.....	24
Figura 22. Gráfica de la curva del pico de emisión del centellador BC422.....	25
Figura 23. Esquema de las partes interiores que componen un PMT acoplado a un centellador.....	27
Figura 24. Estructura de una red cristalina tipo diamante, propia del diamante, el silicio Si y el germanio “Ge”.....	28
Figura 25. Bandas de energía del silicio.....	29
Figura 26. Semiconductor de Si dopado con material trivalente y pentavalente.....	29
Figura 27. Vista superior de una imagen micrográfica de un SiPM, donde se pueden apreciar las celdas que lo conforman. Las dimensiones del SiPM son $1 \times 1 \text{ mm}^2$	30
Figura 28. Representación gráfica del sistema de detección con acoplamiento centellador-SiPM que se simuló en este estudio, enumerando cada una de sus partes: 1) Fuente/origen de muones, 2) Haz de muones, 3) Centelladores a simular y 4) SiPMs/Scores como fotosensores.....	34
Figura 29. Ilustración representativa de la geometría $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ simulada en Geant4, correspondiente a un centellador de plástico acoplado a dos SiPMs ubicados en los lados centrales.....	36
Figura 30. Mapa conceptual que muestra la organización de las simulaciones por: material centellador, dimensiones de volumen y configuración de haz. El texto “5 Simulaciones” se refiere a los 5 tamaños de volumen explicados previamente: ($100 \times 100 \times 20$, $50 \times 50 \times 10$, $40 \times 40 \times 5$, $20 \times 20 \times 5$ y $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$).....	38
Figura 31. Ilustración de histogramas (líneas azules) ajustados a distribuciones Landáu (líneas rojas) pertenecientes a los datos registrados por los dos Scores colocados en el centellador.....	39
Figura 32. Distribución Gaussiana formado por los promedios (μ) de cada distribución Landáu asociada a los tiempos de llegada (TOF) de los fotones por cada evento.....	41

Figura 33. En el recuadro de la izquierda se muestra una distribución <i>gaussiana</i> correspondiente a un arreglo de 2 SiPM, 20x20x3mm ³ , centellador BC-422 y haz de muones centrado.....	42
Figura 34. Histogramas de los datos correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-404 e interacción al centro del centellador.....	43
Figura 35. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-422 e interacción de haz al centro del centellador.....	44
Figura 36. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-404 e interacción de haz en la esquina izquierda del centellador.....	44
Figura 37. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-422 e interacción de haz en la esquina izquierda del centellador.....	44
Figura 38. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-404 e interacción de haz aleatorio sobre la superficie del centellador.....	45
Figura 39. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-422 e interacción de haz aleatorio sobre la superficie del centellador.....	46
Figura 40. Resolución Temporal (RT) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 Scores, centelladores BC-404 & BC-422 y 3 interacciones debida al haz de muones: Interacción aleatoria, centrada y en la esquina del centellador.....	48
Figura 41. Promedio de tiempos de llegada (TOF) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 Scores, centelladores BC-404 & BC-422 y 3 interacciones debida al haz: Interacción aleatoria, centrada y en la esquina del centellador.....	48
Figura 42. Promedio de tiempos de llegada (TOF) vs Resolución Temporal (RT) para los detectores correspondientes a 2 SiPM, centelladores BC-404 & BC-422 con interacción de haz al centro del centellador.....	49
Figura 43. Promedio de tiempos de llegada (TOF) vs Resolución Temporal (RT) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 SiPM, centelladores BC-404 & BC-422 con haz de muones dirigido a la esquina izquierda del centellador.....	50
Figura 44. Promedio de tiempos de llegada (TOF) vs Resolución Temporal (RT) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 SiPM, centelladores BC-404 & BC-422 con haz de muones distribuido aleatoriamente sobre el centellador.....	50
Figura 45. Cociente entre los valores de RT del material BC-404 sobre BC-422 con sus respectivos errores. Valores de haz aleatorio de muones.....	52
Figura 46. Cociente entre los valores de TOF del material BC-404 sobre BC-422 con sus respectivos errores. Valores de haz aleatorio de muones.....	52

Resumen

Los detectores de bajo valor en resolución temporal (rapidez para distinguir dos eventos) son relevantes en aquellos experimentos o simulaciones donde las partículas a detectar, tienen un tiempo de vuelo (TOF) muy corto, por lo que se requiere que los tiempos de detección estén en el rango de ns. & ps. A través el software GEANT4 se realizaron simulaciones Monte Carlo con 5 tamaños de dos plásticos centelladores el BC-404 y BC-422. Dichos tamaños fueron de 100x100x20, 50x50x10, 40x40x5, 20x20x5 y 20x20x3 mm³. También se emularon dos áreas efectivas de 3x3 mm² (Scores), acopladas en los lados centrales de cada centellador, representando el área sensible de los fotomultiplicadores de silicio (SiPMs). Para caracterizar la resolución temporal intrínseca, se requirió cuantificar el tiempo de llegada de los fotones ópticos que alcanzan los Scores, los cuales son generados por muones de 1 GeV, al interactuar con el volumen del plástico centellador. Los muones interaccionaron de tres formas distintas: un haz aleatorio que cubre toda la superficie del centellador, un haz dirigido al centro del centellador y un haz dirigido a la esquina inferior izquierda del centellador. En este trabajo se muestra el estado del arte relacionado con radiación, los principios de centelleo y los conceptos de fotodetectores. También se muestran los resultados y el análisis de los diferentes valores de resolución temporal intrínseca, obtenidas utilizando el *marco de programación* denominado ROOT. La resolución temporal de menor valor de tiempo fue registrada con $\sigma = 7.64 \pm 0.43$ ps., reportado por el arreglo del detector configurado con material de centelleo BC-422, un volumen de 20x20x3 mm³ y el haz de muones dirigido a la esquina izquierda del centellador.

Palabras clave: *Radiación, centelladores plásticos, fotodetección, SiPM, resolución temporal intrínseca, simulación Monte Carlo.*

Abstract

The low time resolution detectors value (speed for distinguish two events) are relevant in those experiments or simulations where the particles to detect, have a very short a time of flight (TOF), this is why it's required that detection times are ranged between ns. & ps. Through the software GEANT4 it was made Monte Carlo simulations with 5 sizes of two scintillation plastic: BC-404 & BC-422. Those sizes were de 100x100x20, 50x50x10, 40x40x5, 20x20x5 and 20x20x3 mm³. Also it was emulated two effective areas of 3x3 mm² (Scores), coupled in the central sides of each scintillator, representing the silicon photomultipliers (SiPMs) sensible area. To characterize the intrinsic time resolution, it was required to quantify the arrival time of the optical photons that reach the Scores, which are generated by muons of 1 GeV, when interact with the plastic scintillators volume. The muons interacted by three different ways: a random beam that covers all the scintillator surface, a beam directed to the scintillator center and a beam directed to the scintillator left below corner. In this work it is shown the state of art related with radiation, scintillation principles and photodetector concepts. Also it's shown the results and the analysis of the intrinsic time resolution different values, obtained using the programming-framework called ROOT. The lowest time resolution value was achieved with con $\sigma = 7.64 \pm 0.43$ ps., Reported by the detector arrangement configured with the BC-422 scintillation material, a volume of 20x20x3 mm³ and the muons beam directed to the scintillator's left below corner.

Key words: Radiation, plastic scintillator, photodetection, SiPM, Intrinsic Time resolution, Monte Carlo simulation.

Motivación

En la actualidad el uso de simulaciones computacionales ha sido de gran popularidad en el desarrollo del ámbito científico e ingenieril, como por ejemplo en el diseño de sistemas de detección de partículas, que antes de realizar el experimento o posterior a la realización del mismo, la simulación llega a ser útil para la verificación de los resultados a través de comparar los datos obtenidos en el experimento y en la simulación. De hecho, la simulación ha venido a ser una misión crítica en campos como la física de altas energías y ciencias espaciales (Allison et al, 2016).

En trabajos como el de Marco Ayala et al.[55] se realiza un estudio experimental de sistemas de fotodetección basados en plásticos centelladores (BC-404, BC-422 & BC-422Q) acoplados a fotomultiplicadores de silicio (SiPMs) para la investigación en rayos cósmicos, en el cual se argumenta que los fotomultiplicadores SiPMs tiene el potencial para reemplazar a los tradicionales Tubos Fotomultiplicadores (PMTs) en muchas aplicaciones, como detectores Triggers, detectores de tiempo de vuelo (TOF) y calorimetría. Comparados con PMTs, los sensores SiPMs proveen similarmente una alta eficiencia de detección fotónica y una muy buena resolución temporal, pero, además ellos ofrecen compacidad habilidad de operar en un campo magnético y bajo consumo de energía (Ayala et al., 2019). Por otro lado, en estudios como el de Heber Zepeda [53], se investiga la resolución temporal de sistemas de detección simulados en GEANT4 para dos plásticos centelladores (BC-404 & BC-422) de dimensiones de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ acoplados a SiPMs de $3 \times 3 \text{ mm}^2$. En este estudio se argumenta que los SiPMs han sido usados frecuentemente en los últimos años comparados con los PMTs, debido a su bajo costo, bajo voltaje de polarización y su tamaño que puede llegar a tener dimensiones de hasta de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ (Zepeda, 2020). Además de configurar Piones (partículas presentes en rayos cósmicos que decaen en muones) a 0.5 GeV como partículas primarias para generar fotones ópticos y cuantificar su resolución temporal intrínseca.

El siguiente estudio Monte Carlo es realizado con condiciones de energía promedio de rayos cósmicos (1 GeV), las cuales pueden ser replicadas de forma experimental en un laboratorio para su verificación con los datos computacionales. Así mismo simular la interacción de muones con arreglos de detectores nos permite comparar los estudios con los experimentos relacionados con la calibración de detección de muones atmosféricos, o trazas de rayos cósmicos. De igual manera el estudio e implementación de este tipo de detectores en integración con otros detectores, puede apoyar a obtener información sobre la física de las colisiones de iones pesados, como los experimentos que se llevan a cabo en *NICA (Nuclotron Ion Collider fAcility)*. Esta información es relevante para mejorar el entendimiento de la evolución del Universo primitivo y la formación de estrellas de neutrones. Por lo cual este tipo de investigación pueden ayudar al crecimiento de áreas como física de detectores, física de partículas, altas energías, cosmología etc. [1,2,3].

Capítulo 1

Introducción

Los detectores de alta resolución son relevantes en aquellos experimentos o simulaciones donde se requiere que los tiempos de detección sean del orden de nanosegundos (*ns.*) & picosegundos (*ps.*), debido a esto las partículas a detectar llegan al dispositivo de fotomultiplicación con un tiempo de vuelo corto (*TOF*) [4,5].

La resolución de un detector puede ser clasificado en distintos tipos: espectral, espacial y temporal. En este trabajo confiere la caracterización de la resolución temporal (TR) de arreglos de detectores, la cual puede ser entendida como la capacidad que tiene el dispositivo de detectar fidedignamente dos señales consecutivas en el tiempo (en este caso dos fotones), es decir que tan rápido es un detector para discriminar dos eventos ocurridos en la menor diferencia de tiempo.

La resolución temporal es un parámetro importante a estudiar en temas relacionados con la detección de partículas. Por ejemplo, en sistemas que están diseñados para "*Triggers*" o para "*eventos coincidentes*" con otros detectores similares [5,6,7]. La mejora de desempeño de los detectores pretende determinar con mayor precisión el tiempo de vuelo de las partículas (*TOF*), y con ello identificar qué tipo de partícula se detecta.

El desarrollo e implementación de este tipo de detectores es importante para la construcción y mejora de sistemas de detección de partículas. Este tipo de detectores se integran con otros detectores para la optimización en la identificación de partículas, en proyectos de aceleradores/colisionadores de partículas e iones como *LHC & JINR* ("*Large Hadron Collider*" y "*Joint Institute for Nuclear Research*" respectivamente). La implementación de detectores de alta resolución no solo trasciende el campo de la investigación en física de partículas y altas energías [1,8,9], también destacan en algunos sistemas de seguridad industrial (*dosimetría, espectrometría, rayos X*) [10,11]. Estos detectores también pueden ser encontrar en hospitales, dentro de algunos equipos de imagenología, como *rayos X (XR), fluoroscopia radiográfica (RF), tomografía computarizada (TC), tomografía por emisión de positrones (PET)* y *microscopía de barrido (SEM)*. En las Figuras 1, 2, 3 y 4 se muestran ejemplos de algunos equipos mencionados anteriormente [2,5,11].

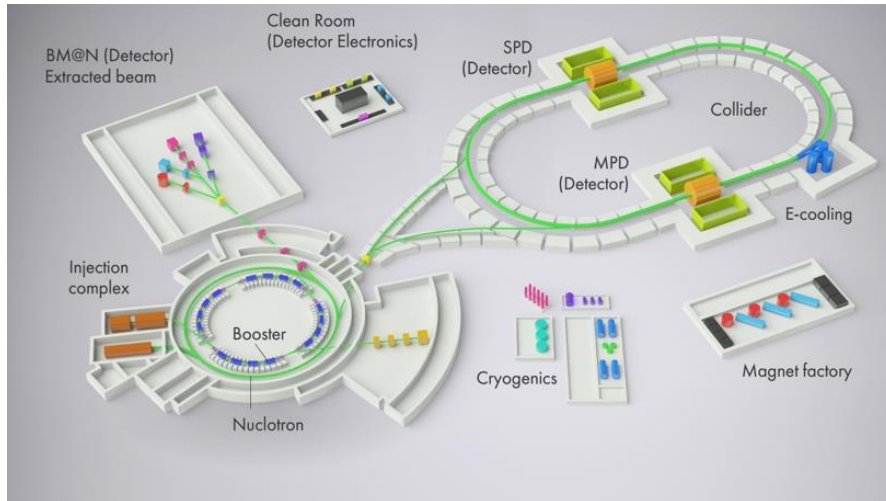


Figura 1. Esquema de la distribución del acelerador NICA obtenida de [13].



Figura 2. Equipo médico PET/CT obtenida de GE Healthcare® [14]



Figura 3. Equipo médico. XR/FR. Obtenido de Healthineers® [15].



Figura 4. Equipo de microscopía de barrido electrónico (SEM) obtenida de TESCAN® [16]

Al utilizar técnicas de Monte Carlo, es posible realizar simulaciones para estudiar el comportamiento del diseño de nuevos detectores y así poder caracterizar diferentes parámetros de los mismos, como en este caso, la resolución temporal intrínseca.

1.1. Conceptos básicos de Radiación

Los elementos generales que conforman un arreglo de detección con acoplamiento *centellador-SiPM*, son los siguientes: fuente de partículas, haz de partículas, material centellador y fotodetector, mostrados en la Figura 5.

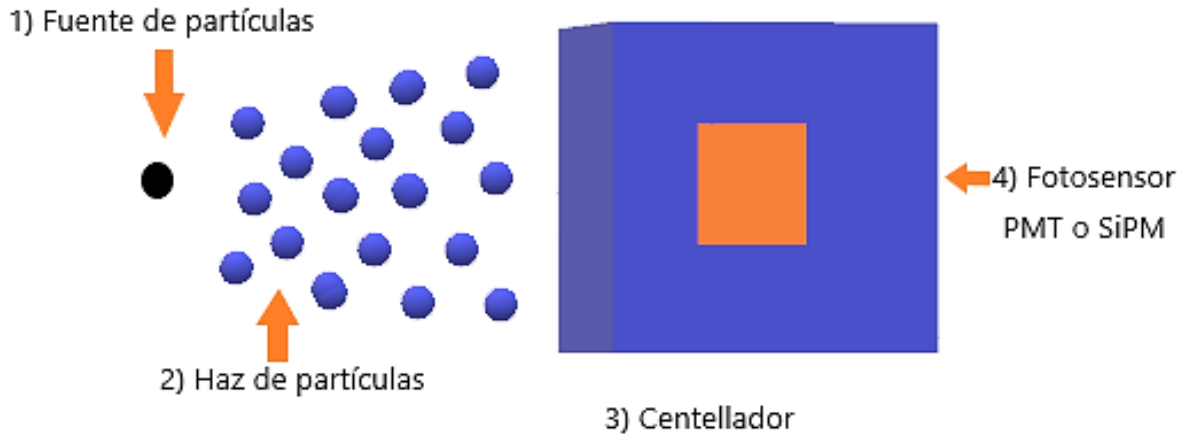


Figura 5. Un diagrama de los componentes que constituyen el acoplamiento centellador-SiPM. De izquierda a derecha 1) Fuentes de partículas y 2) Haz de partículas se ahondarán en la sección 1.2 de este capítulo primer capítulo, 3) Centellador, de las secciones 1.3 a 1.7 y 4) Fotor sensores en la sección 1.8.

Dado que la fuente de partículas de forma general puede ser una fuente radiactiva de algún elemento químico inestable o también ser alguna radiación o partícula específicas se tratarán los temas de decaimiento radioactivo y del decaimiento de las partículas que nos confiere simular (*muones*), de los cuales se hablará más adelante en este capítulo.

1.1.1. Núcleo Atómico

Comencemos por hablar acerca del núcleo atómico. Un átomo de forma general lo podemos representar por un núcleo y varios electrones; el núcleo formado por protones y neutrones, los cuales poseen carga eléctrica positiva y neutra respectivamente, y los electrones con carga negativa que giran y se mueven sobre *una nube de probabilidad* alrededor del núcleo [17].

El número de neutrones en un átomo se expresa con la letra “N”. El número de protones de un elemento u átomo se expresa con la letra “Z” y se le conoce como *número atómico*. El número másico de un elemento se representa con la letra “A”, el cual es la suma del número protones y de neutrones. El número de masa “A” se puede expresar mediante la siguiente relación

$$A = Z + N \quad (1.1)$$

Los núcleos atraen a los electrones necesarios para balancear su carga, siendo éstas de igual magnitud, pero de signo contrario. Así que un átomo neutro es aquél que tiene igual cantidad de electrones y de protones.

Cualquier átomo se puede expresar de la siguiente manera:

$${}^A_ZX \quad (1.1.1)$$

dónde

X = Cualquier símbolo químico del elemento

A = Número de masa

Z = Número de protones

1.1.2. Isótopos

Los átomos de un elemento particular, que poseen el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones, se conocen como isótopos de un elemento.

Los núcleos de los isótopos se desintegran conllevando a que el número de protones, neutrones y electrones puedan cambiar y por tanto se les atribuye ser configuraciones atómicas con núcleos inestables. Los isótopos se obtienen artificialmente en un laboratorio mediante el uso de aceleradores o reactores nucleares, donde un núcleo de un átomo estable es bombardeado con partículas subatómicas.

1.1.3. Decaimiento Radiactivo

Una fuente de radiación como un conjunto de núcleos, de isótopos o partículas inestables tienen la característica de ser radiactivas. *La radiactividad o radioactividad*, es la propiedad que tienen los núcleos atómicos inestables de ciertos elementos químicos, naturales o artificiales los cuales al desintegrarse emiten partículas u ondas electromagnéticas de alta energía, llamada comúnmente radiación. La Figura 6 muestra una gráfica de todos los núcleos conocidos, representados en color azul todos aquellos estables, y los inestables en sombreado gris.

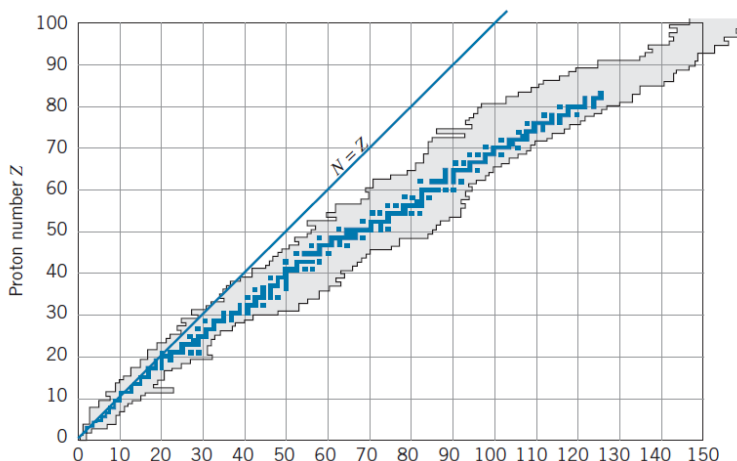


Figura 6. Gráfica. Núcleos estables están mostrados en color azul, núcleos radiactivos conocidos son mostrados en color gris. Eje “y” es el número atómico “Z”, y el eje “x” es el número de neutrones. Obtenida de Kenneth Krane [18]

La mayoría de los núcleos representados en la Figura 6 son inestables, como se mencionó anteriormente quiere decir que se transforman así mismos en un núcleo más estable al cambiar el número atómico Z y el número de neutrones N a través del decaimiento alfa “ α ” (emisión de ${}^4_2\text{He}$) o decaimiento beta “ β ” (transformando un neutrón a protón y electrón, o un protón a neutrón y positrón). Los núcleos al ser excitados pueden ser energéticamente inestables y regresar a su estado basal a través del decaimiento gamma “ γ ” (emitir fotones). Los tipos de radiación más comunes son; la radiación corpuscular, como las partículas alfa y beta; y la radiación electromagnética; como los rayos X, los rayos gamma y rayos cósmicos.

La velocidad a la que un núcleo inestable decae dentro de una muestra, se denomina *actividad*. A medida que la *actividad* sea más grande, significa que una mayor cantidad de núcleos decaen o se desintegran por unidad de tiempo. La unidad fundamental para medir la actividad es el curie. En un principio esta unidad fue definida como la actividad de un gramo de radio puro (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) sin embargo, dicha definición fue reemplazada por una más conveniente mostrada a continuación:

$$1 \text{ curie(Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \frac{\text{desintegraciones}}{\text{segundo}} \quad (1.2)$$

Dado que un *curie* es una actividad muy grande, usualmente se trabaja con unidades como el milicurie (mCi) o microcurie (μCi). A pesar de que el *curie* (Ci) es utilizado ampliamente en la literatura, esta unidad pasó a ser reemplazada gradualmente por su equivalente en el sistema internacional SI, el becquerel (Bq).

El becquerel es definido como una desintegración por segundo, el cual cumple la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci} \quad (1.2.1)$$

para fuentes radiactivas de gran tamaño, su actividad suele medirse en kilobecquerels (kBq) o megabecquerels (MBq). La actividad de una fuente de radioisótopo está definida como la tasa o velocidad de decaimiento, y esta expresada matemáticamente de la siguiente manera:

$$\frac{dN}{dt} = -\kappa N \quad (1.2.2)$$

N = Número de núcleos radiactivos disponibles de la muestra

κ = Constante de decaimiento (= $\ln 2$ / vida media)

Resolviendo la ecuación diferencial (Ecuación 1.2.2) mediante el método de separación de variables se obtiene la ecuación 1.2.3, conocida como *la ley fundamental de decaimiento radiactivo*. Esta ecuación permite calcular el número de átomos presentes " N " en una muestra, los cuales decaen o desintegran en un tiempo " t " a partir de una población inicial de radionúclidos N_0 .

$$N(t) = N_0 e^{-\kappa t} \quad (1.2.3)$$

La vida promedio de un núcleo o tiempo de decaimiento (constante de tiempo τ) está asociada a la constante de decaimiento κ , de acuerdo a:

$$\tau = \frac{1}{\kappa} \quad (1.2.4)$$

el cual es promedio de la vida de un núcleo o de una partícula subatómica antes de comenzar a desintegrarse.

Otro parámetro útil es el tiempo de vida media $t_{1/2}$ de una fuente, el cual describe el tiempo que le toma a la actividad de un conjunto de átomos reducirse a la mitad, la cual está definido como:

$$t_{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln 2 = \frac{0.693}{\kappa} \quad (1.2.5)$$

1.2. Rayos C3smicos

Los rayos c3smicos son part3culas que arriban a la atm3sfera de la tierra desde el espacio exterior, cuya energ3a se encuentra en un rango de $10^5 eV$ a $10^{20} eV$. Dichos rayos c3smicos pueden estar compuestos de distintas part3culas como fotones, electrones o part3culas masivas como protones, piones y claramente muones. Estudiar dichos rayos c3smicos permite obtener informaci3n de su procedencia en nuestro universo, lo que requiere el an3lisis de eventos de part3culas sometidas a altas energ3as y temas relacionados con cosmolog3a. La fuente principal de muones sobre la Tierra es la radiaci3n c3smica [19]. Las primeras interacciones hadr3nicas tienen sitio entre 10km y 40 km de altura en la atm3sfera, debido a la escasez de 3tomos a dicha altitud los rayos c3smicos tienen mayor probabilidad de decaer que de interactuar en otras part3culas. Cuando se dan colisiones entre protones “p” y alg3n n3cleo de la atm3sfera terrestre, se pueden generar piones y kaones. Estas 3ltimas dos part3culas decaen en muones de acuerdo a las reacciones mostradas a continuaci3n:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad [99,99\%] \quad (1.3)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad [99,99\%] \quad (1.3.1)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad [63,43\%] \quad (1.3.2)$$

$$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad [63,43\%] \quad (1.3.3)$$

donde π^+ y π^- son el *pi3n m3s* y *pi3n menos*, K^+ y K^- , son el *ka3n m3s* y *ka3n menos*, μ^+ y μ^- son el *mu3n m3s* y *mu3n menos* y ν_μ y $\bar{\nu}_\mu$ son el *neutrino* y *antineutrino mu3nico* [17]. A un lado de las reacciones, entre corchetes se indica la fracci3n del total de reactivos que decae a esos productos en esa reacci3n particular. El K^+ tambi3n decae con una probabilidad del 21,13% en “ $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ”, donde π^+ decae luego a m3s muones (Ecuaciones 1.3.2 y 1.3.3) (Oda, 2016). Con esto es prudente intuir que la proporci3n de muones en la atm3sfera debida a los rayos c3smicos no ser3 despreciable. Los π^\pm y K^\pm poseen una vida media de $\tau_{\pi^\pm} \cong 26.03 ns$ y $\tau_{K^\pm} \cong 12.38 ns$ respectivamente (Ecuaci3n 1.2.4).

Los muones son part3culas inestables y elementales que pertenecen a la familia de los leptones [20]. Una vez que los muones son creados comienzan a decaer r3pidamente en el tiempo, mediante las siguientes reacciones:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.3.4)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.3.5)$$

dónde e^+ y e^- son el *electrón* y el *positrón*, y el ν_e y $\bar{\nu}_e$ son el *neutrino* y *antineutrino electrónico*. Su modelo de decaimiento exponencial puede ser obtenida mediante la resolución de la siguiente ecuación diferencial (Ecuación 1.3.6), pudiendo observar que su solución es equivalente a la de sustituir (1.2.4) en la ecuación (1.2.3):

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau_\mu} \quad (1.3.6)$$

realizando separación de variables, se obtiene...

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_\mu}} \quad (1.3.7)$$

Dónde $N(t)$ es la población de muones a cualquier tiempo t , N_0 es la población inicial de muones y τ_μ es el tiempo de vida promedio (Ecuación 1.2.4) del muón, el cual ha sido medido en experimentos con un valor de $\tau_\mu \cong 2.15 \mu s$ [21].

El muón fue descubierto en el año 1936 por los físicos C. Adversan y H. Neddermeyer; tras analizar la pérdida de energía de las cascadas de los rayos cósmicos [22] observaron como algunas de sus partículas curvaban su trayectoria en presencia de un campo electromagnético de forma muy distinta a la de electrones u otras partículas conocidas.

Los muones poseen la misma carga que el electrón, sin embargo, el muón es aproximadamente 207 veces más másico que electrón [23]. La masa del electrón tiene un valor de

$$m_e = 0.511 \frac{MeV}{c^2} \quad (1.3.8)$$

Por otro lado, se ha medido mediante experimentos [23,24] que la masa del muón “ m_μ ” tiene un valor aproximado de

$$m_\mu \cong 106 \frac{MeV}{c^2} \quad (1.3.9)$$

dividiendo la Ecuación (1.3.9) entre (1.3.8) se comprueba que el valor del muón m_μ es aproximadamente 207 veces el valor de la masa del electrón m_e (1.3.8).

$$\therefore \frac{m_\mu}{m_e} \cong 207 \quad (1.4.0)$$

A continuación, confiere hablar de las generalidades y particularidades del siguiente elemento que forma parte del arreglo de detección a simular, este elemento corresponde al material centellador, ilustrado en la Figura 5.

1.3. Fundamentos de Detección por Centelleo

La detección de radiación ionizante por luz de centelleo producida en ciertos materiales es una de las técnicas más antiguas registradas [25]. De acuerdo al autor Glenn F. Knoll, el material centellador ideal debería poseer las siguientes propiedades:

- I. Debe convertir la energía cinética de partículas cargadas en luz detectable/medible con una alta eficiencia.
- II. Esta conversión de energía debería de ser lineal, es decir; la tasa de rendimiento de luz debe ser proporcional a la energía depositada en el rango más amplio posible.
- III. Para la adecuada captación de luz, el medio debe ser transparente favoreciendo así la longitud de onda de emisión del mismo.
- IV. El tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida debe ser suficientemente corta para que se puedan generar pulsos de señal rápidos sin empalmarse con sus consecutivos.
- V. El material debe ser de buena calidad óptica y sujeto a tamaños de manufactura suficientemente grandes, para ser de interés como detector práctico.
- VI. Su índice de refracción debe ser cercano al del vidrio (≈ 1.5) para permitir un acoplamiento eficiente de la luz centellante hacia un tubo fotomultiplicador (PMT) u otro fotosensor.

Los centelladores existentes no cumplen con todas estas propiedades al mismo tiempo por lo cual las combinaciones de estas propiedades en un material centellador destinaran su aplicación. Dichos centelladores son fabricados de distintos materiales como pueden ser:

- *Centelladores inorgánicos* contemplando una inmensa variedad de ramas, que por considerar a algunos se menciona a los centelladores de haluros de alquilo: ioduro de sodio adicionado con trazas de talio "*NaI(Tl)*", el ioduro de cesio activado con sodio "*CsI(Na)*" o el ioduro de litio adicionado con europio "*LiI(Eu)*", los cuales llevan a cabo el fenómeno de centelleo mediante dopados, trampas y defectos de su respectiva red cristalina, la cual es representada en la Figura 7, conduciendo a estados metaestables capaces de almacenar y emitir luz.
- *Centelladores orgánicos* que pueden clasificarse primordialmente en cristales orgánicos puros y dopados.
- *Centelladores líquidos* se producen a través de disolver un centellador orgánico en un solvente, obteniendo un líquido compuesto de dos fases o inclusive una tercera, como un agente encargado de desfasar la longitud de onda de su espectro de emisión, como el POPOP.

- *Centelladores plásticos*, los cuales son producidos al disolver un centellador orgánico en un solvente y llevar a cabo un proceso de polimerización.

Dado que este último tipo de centellador es el que se utilizará para este estudio, a continuación, se presentará información referente a las generalidades y propiedades de los centelladores orgánicos y plásticos, para finalmente abordar a los materiales centelladores *Bicron-404 (BC-404)* y *Bicron-422 (BC-422)* que son los materiales particulares que simularemos y evaluaremos en este trabajo de resolución temporal.

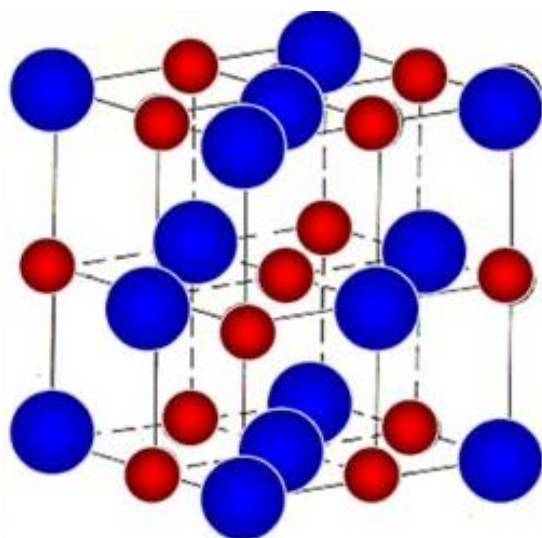


Figura 7. Representación de una estructura cristalina de un compuesto iónico arbitrario. Las esferas rojas representan un ion alcalino, y las esferas azules un ion halógeno como Na^+ y Cl^- para formar cloruro de sodio ($NaCl$).

1.4. Centelladores Orgánicos Puros

Es relevante mencionar este tema, ya que los materiales plásticos que nos confiere estudiar están constituidos por un centellador *orgánico* polimerizado.

Los materiales que han tenido mayor popularidad en el mercado como centelladores cristalinos orgánicos puros son el antraceno y el estilbeno. El Antraceno, $C_{14}H_{10}$, cuya estructura molecular se muestra en la Figura 8, es uno de los materiales orgánicos más antiguos usados para fines de centelleo. El antraceno se caracteriza por tener la eficiencia más alta de centelleo de cualquier centellador orgánico en el mercado.

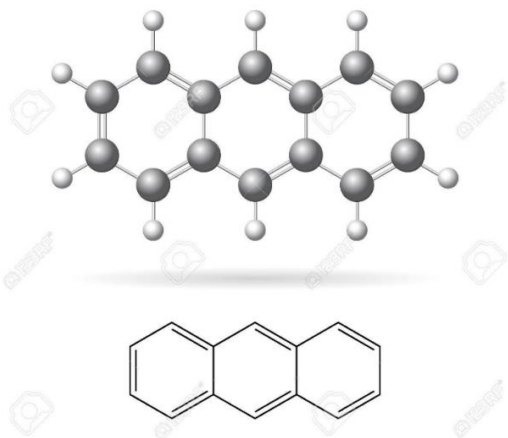


Figura 8. Estructura molecular del Antraceno.

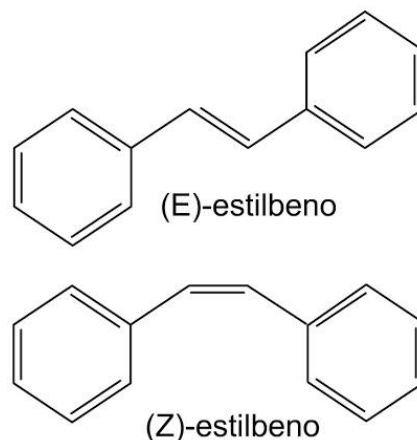


Figura 9. Representación estructural de las moléculas del Estilbeno.

Por otro lado, el estilbeno $C_{14}H_{12}$, tiene una menor eficiencia de centelleo, pero se prefiere usar en contextos en donde la discriminación de la forma de pulso pueda ser aplicada a distinguir centelleo inducido por partículas cargadas y electrones. En la Figura 9 se muestran los dos isómeros existentes del estilbeno, el (*E*)- *estilbeno* en la parte superior y el (*Z*)- *Estilbeno* en la parte inferior. Ambos materiales, tanto el antraceno como el estilbeno son frágiles y difíciles de manufacturar en dimensiones grandes [25].

1.5. Mecanismo para emisión de luz

Mientras que el proceso de emisión de luz para un centellador inorgánico depende de una determinada red cristalina, como en la Figura 7, la emisión de luz para un centellador orgánico está basada en las transiciones de los niveles energéticos de una sola molécula y por tanto esta emisión se llega a dar independientemente del estado físico del material, ya sea sólido, líquido, vapor o multicomponente.

Una amplia gama de centelladores orgánicos se basan en moléculas orgánicas las cuales cumplen con cierta simetría en sus orbitales moleculares, denominada estructura de *orbitales electrónicos π* , representados en la Figura 13, los cuales son requeridos para emitir luz. Existen dos procesos en las estructuras de estos orbitales por medio de las cuales los centelladores generan luz, estos son la: *fluorescencia* y *fosforescencia*. La *fluorescencia* consiste en la emisión de luz visible inmediatamente después de que una molécula alcance un estado energético excitado; la emisión de luz por el material desaparece al retirar la fuente que lo irradia, la duración de transición de cada fotón en este fenómeno es del orden de nanosegundos (10^{-9}seg.). Mientras que la *fosforescencia* se caracteriza por emitir luz visible con una longitud de onda más grande que la *fluorescencia*, añadiendo que dicha

emisión de luz permanece aún después de haber retirado la fuente de radiación, teniendo una duración del orden de milisegundos (10^{-3}seg.) [26]. La diferencia en la permanencia de emisión de luz entre ambos procesos recae en que si los electrones excitados llevan a cabo el proceso de liberación de energía de forma directa o van pasando por estados intermedios ocasionando que el proceso de liberación de luz demore más tiempo.

En la Figura 10, se muestra un diagrama de Jablonski, el cual nos permite observar las transiciones entre los estados electrónicos que una molécula experimenta al absorber energía. De acuerdo a la Figura 10 la energía puede ser absorbida cuando se excita un electrón y realiza una transición del estado basal S_0 a un estado *singlete*: S_1, S_2 o S_3 , los estados que se encuentran entre ellos corresponderían a $S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{21}, \text{etc.}$, y se refieren a estados vibracionales de la molécula [27,28], los cuales poseen un excedente de energía mayor al de un estado electrónico, pero no lo suficiente grande como para situarse en un estado electrónico superior.

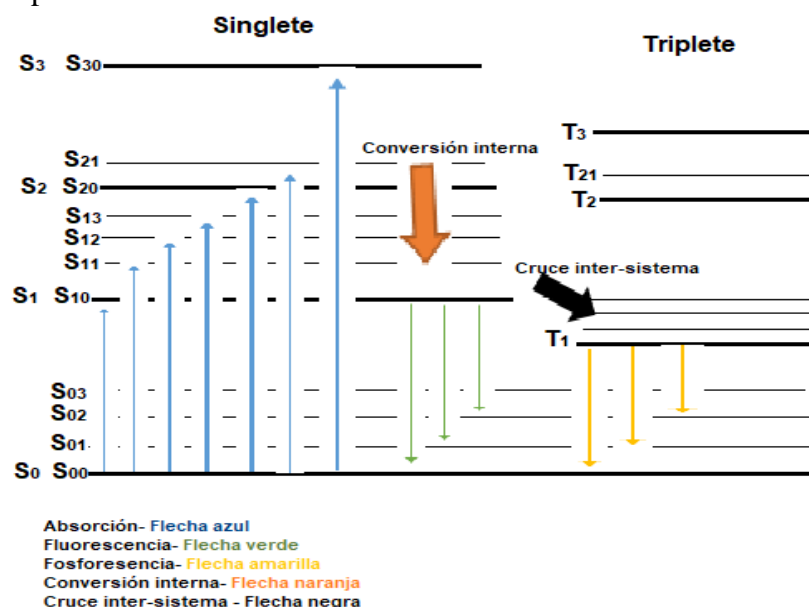


Figura 10. Niveles de energía de una molécula orgánica con estructura de electrones π , representando fenómenos de fluorescencia y fosforescencia. Las flechas representan transiciones energéticas: hacia arriba y azul - *absorción de energía*, flechas hacia abajo, verdes y amarillas representan la *liberación* de la misma en forma de *fluorescencia* y *fosforescencia*, respectivamente. Flecha naranja y hacia abajo representa una *conversión interna*, una flecha negra un *cruce entre sistemas*. Obtenido de [28].

Cuando un estado excitado singlete (S_3 o S_2) pasa a un estado menor (S_2 o S_1) de forma no radiativa se denomina *conversión interna*. Donde haya una transición electrónica del primer estado singlete excitado (S_1) al estado basal o fundamental (S_0) habrá emisión rápida de luz visible, denominada *fluorescencia*. Por otro lado, si se presenta una transición de un estado excitado singlete (S_3, S_2 o S_1) a un estado triplete (T_3, T_2 o T_1) se le llama *cruce intersistema*, mostrado en la Figura 10. Cómo se muestra en la Figura 11, este *cruce intersistema* consiste en invertir el espín de un electrón excitado de b) a c) (desapareado a

apareado). Cuando suceda una transición electrónica del primer triplete excitado T_1 al estado fundamental/basal S_0 se emite luz a través de una relajación vibracional, la cual libera poco a poco la energía, ocasionando que la emisión de luz tenga una menor energía, pero que dure más tiempo.

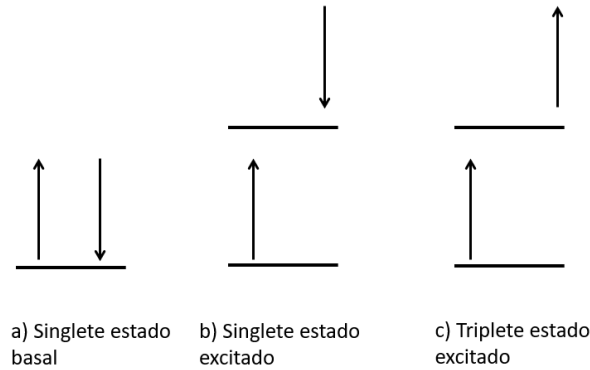


Figura 11. Sentido del espín de los electrones en niveles energéticos singlete y triplete. La flecha hacia arriba indica espín $s = +\frac{1}{2}$, y flecha abajo espín $s = -\frac{1}{2}$.

Se desea, de preferencia, que el fenómeno de centelleo se presente mayoritariamente a la fluorescencia más que a la fosforescencia, ya que la fluorescencia al poseer una corta duración da la pauta a que un detector pueda distinguir emisiones de fotones individuales, percibiéndolos como pulsos de luz. Por el contrario, en la fosforescencia, las emisiones de luz debido a un fotón con su consecutivo pueden llegar a confundirse, debido a que la duración de la emisión de luz por un fotón es más longeva en este proceso, conlleva a que dicha señal lumínica pueda sobrelaparse con la de un fotón siguiente.

La luz principal de centelleo o fluorescencia rápida, es emitida por transiciones electrónicas entre el estado S_{10} y alguno de los estados vibracionales asociados al estado electrónico fundamental ($S_{00}, S_{01}, S_{02}, \dots$).

El comportamiento de la intensidad de fluorescencia rápida con respecto al tiempo t , debido a la excitación por alguna partícula cargada se modela mediante:

$$I = I_0 e^{-t/\tau_f} \quad (1.5)$$

donde τ_f (constante de tiempo) es el tiempo de decaimiento o vida promedio de la fluorescencia presente entre el estado excitado S_{10} y estados vibracionales del estado electrónico fundamental. Es posible observar que el decaimiento exponencial es un fenómeno intrínseco presente en la medición de la radiación como se vio en las Ecuaciones (1.2.3) y (1.3.7).

1.6. Respuesta de Luz

Una pequeña fracción de la energía cinética perdida por partícula cargada es convertida en energía fluorescente tras ser absorbida por el centellador. La energía residual es disipada primordialmente en forma de vibraciones o calor dentro del enrejado de la estructura molecular del material. La fracción de la energía de la partícula convertida (la eficiencia del centelleo), depende del tipo de ambos factores: del tipo de partícula y de su energía. En ciertos casos la eficiencia de centelleo puede ser independiente de la energía, conllevando a una dependencia lineal del rendimiento de luz en la energía inicial. Para centelladores orgánicos como antraceno, estilbena, y muchos de los centelladores líquidos y plásticos disponibles comercialmente, la respuesta de los electrones es lineal para partículas con energías arriba de 125 keV [25]. La respuesta para partículas pesadas cargadas como protones y partículas α es siempre menor para energías equivalentes y no lineal para energías mucho más altas. En la Figura 12, se muestra la respuesta de centelleo de un centellador plástico típico.

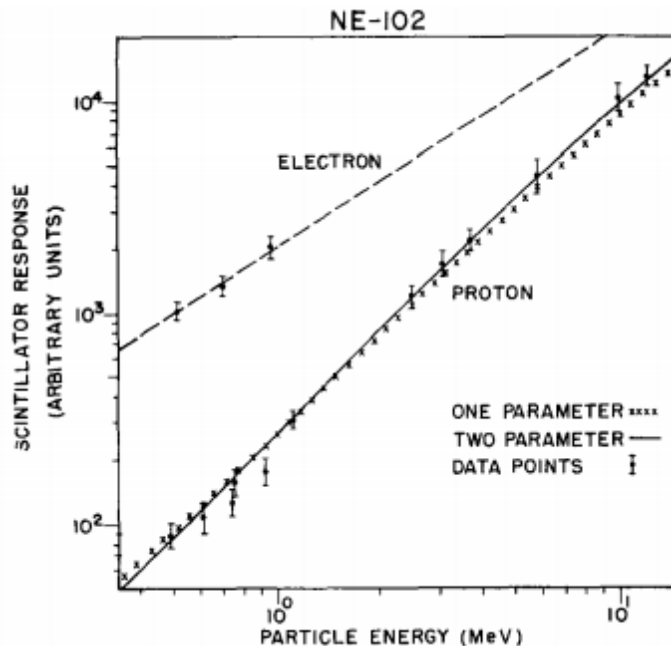


Figura 12. Gráfica del rendimiento de la luz de centelleo para un centellador plástico común (NE-102), cuando es excitado por protones y electrones. Obtenido de Craun y Smith [29].

La respuesta de centelladores orgánicos a partículas cargadas puede ser descrita mediante la tasa de energía fluorescente emitida por unidad de longitud " $\frac{dL}{dx}$ ", y la pérdida

específica de energía de dicha partícula " $\frac{dE}{dx}$ ". El rendimiento de la luz es directamente proporcional a la pérdida de energía de acuerdo a la fórmula de Birk:

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx} \quad (1.6)$$

dónde " S " la eficiencia normal de centelleo.

Una versión extendida de la ecuación de Birk para centelladores orgánicos evaluada a bajas pérdidas de energía (cómo cuando es excitado por electrones rápidos, por ejemplo) [25] es la siguiente:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx} + C \left(\frac{dE}{dx}\right)^2} \quad (1.6.2)$$

propuesta por Craun y Smith para distintos centelladores orgánicos, donde " $B \left(\frac{dE}{dx}\right)$ " representa la densidad de energía de moléculas dañadas, " B " es una constante de proporcionalidad. Birk también asume que una fracción " k " de esa energía termina contribuyendo a que la luz se extinga (*Quencheo*) y " C " es tratado como un parámetro de ajuste [25,29].

1.7. Centelladores Plásticos

Como se mencionó en la sección 1.3 de este capítulo, los centelladores plásticos son *polímeros* producidos a través de realizar una *polimerización en cadena* de un solvente orgánico (al inicio líquido) el cual tiene añadidos los compuestos de centelladores orgánicos [25,30].

Las moléculas que poseen *estructuras aromáticas* poseen orbitales electrónicos tipo " π ", representados en la Figura 14, los cuales son necesarios para llevar a cabo los procesos de absorción y transiciones electrónicas, ilustradas en la Figura 10, necesarias para producir *fluorescencia* [25,31]. Los plásticos centelladores aromáticos que destacan comercialmente, pueden estar hechos a base de una matriz de poliestireno "*PS*" (C_8H_8)_n, polivinil-tolueno "*PVT*" [$CH_2CH(C_6H_4CH_3)$]_n (plástico sintético) y materiales conformados por grupos epóxidos. Sus estructuras moleculares se muestran en las Figuras 13, 15 y 16.

Los plásticos centelladores *no aromáticos* son llamados acrílicos, como el polimetilmetacrilato “*PMMA*” ($C_5O_2H_8$)_n, mostrado en la Figura 17, o el polidimetilsiloxano “*PDMS*” (C_2H_6OSi)_n, en la Figura 18. Sin embargo, estos no tienen un rendimiento de luz y eficiencia tan alta como la de un material con una base de polímero aromático [25,30,31].

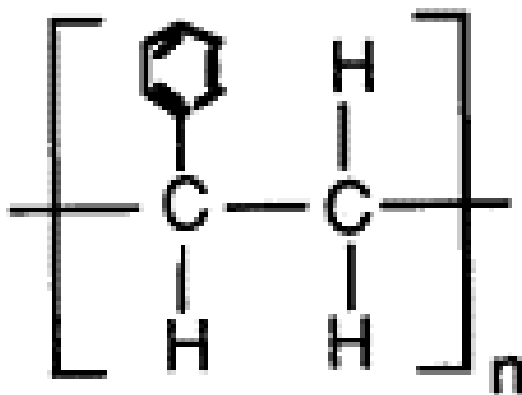


Figura 13. Estructura molecular del poliestireno (C_8H_8)_n, donde la “n” fuera de los corchetes significa que dicha estructura o monómero se encadena consigo mismo “n” veces a través de sus enlaces libres formando un polímero. Obtenido de [32].

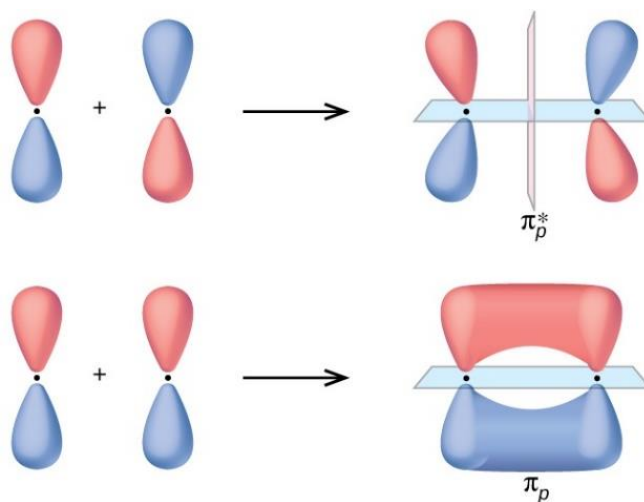


Figura 14. Dos orbitales tipo “p” uniéndose y formando un orbital “ π ”. Los orbitales de la imagen superior aparecen dos planos nodales uno que contiene al núcleo y otro perpendicular a este, donde las fases de las funciones de onda de los orbitales son contrarias presentando una densidad electrónica nula (nodo), este es un enlace “ π^* antienlazante”. La imagen inferior posee solo un plano nodal que contiene los núcleos y que es perpendicular a los orbitales “p” que se han solapado debido a que las funciones de onda de los orbitales interfieren en fase, este es un enlace “ π enlazante”. Obtenida de [33].

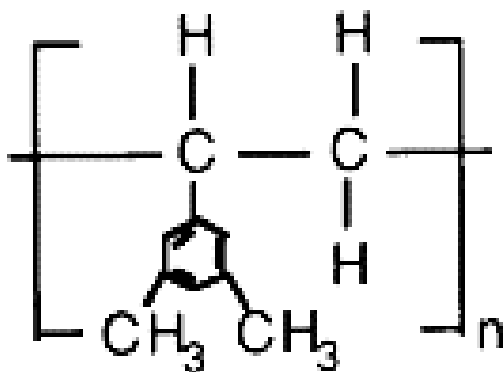


Figura 15. Estructura molecular del polímero PVT (poliviniltolueno). Obtenida de [32]

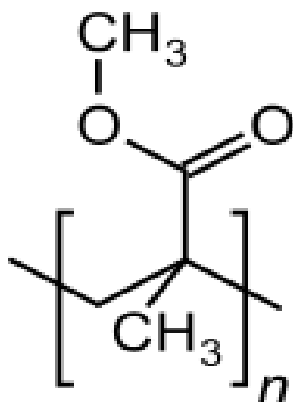


Figura 17. Estructura molecular del monómero no aromático base que se utiliza para producir el plástico centellador polimetilmetacrilato "PMMA".

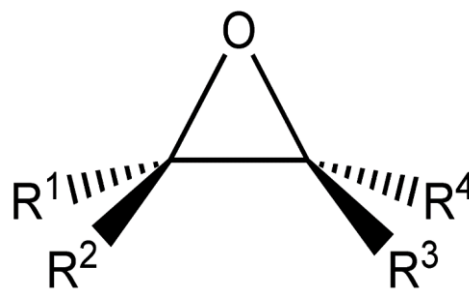


Figura 16. Estructura molecular cíclica triangular de los grupos epóxidos, los cuales también presentan fluorescencia. Los grupos epóxidos se generan a partir de alquenos que sufren ruptura de un doble enlace uniéndose a un oxígeno. Los átomos de carbono unidos al oxígeno están enlazados a grupos radicales laterales R^1 , R^2 , R^3 y R^4 . Las líneas discontinuas que conectan a los carbonos con R^1 y R^4 representan que el sentido de los enlaces se dirige hacia atrás de la pantalla. Obtenido de [34].

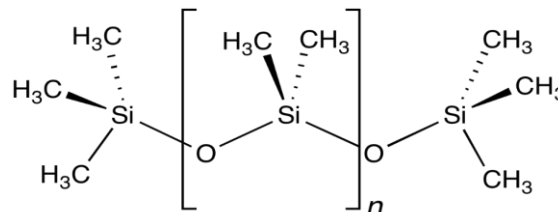


Figura 18. Estructura molecular base, no aromática, usada para producir el plástico centellador dimeticona, "Polidimetilsiloxano o "PDMS".

Sintetizando, el centellador deseado es mezclado de forma homogénea a la base solvente, la concentración de este centellador orgánico debe estar alrededor de 1% del peso de la mezcla (el cual es suficiente para producir una alta emisión de luz), después toda la mezcla es polimerizada en plástico como anteriormente se ha comentado [30].

Los plásticos centelladores están disponibles comercialmente en diversos tamaños y formas como bloques, varillas, cilindros y láminas, ilustrados en la Figura 19 [35]. Dado que no son relativamente caros suelen ser usados como una opción práctica si se requiere un centellador de volumen grande, en dichos casos intervendría la característica *auto-absorbente* del centellador en su desempeño, la cual no sería despreciable (debido a su gran volumen), motivándonos a ser selectivos con las propiedades de atenuación lumínica del material, como por ejemplo, la distancia a la cual la intensidad de luz es atenuada por un factor de "2" ha sido reportada con un valor pequeño para algunos plásticos [25].

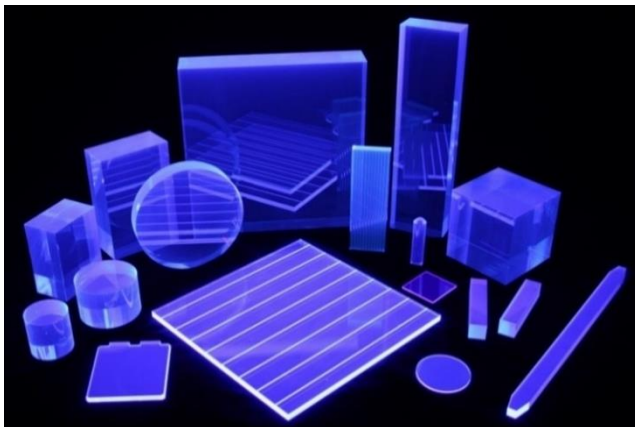


Figura 19. Imagen representativa de las distintas formas geométricas en las que se manufacturan los plásticos centelladores basados en matrices de *PVT* y *flúores*. De Eljen Technology's ® [35].

Debido a la amplia gama de aplicaciones que un centellador plástico desempeña en ámbitos de física de partículas y física médica, en los cuales están expuestos a continuos niveles de radiación, se ha observado y estudiado el proceso de degradación de las propiedades ópticas y de emisión de luz que el material va sufriendo con el paso del tiempo. Este proceso es complicado ya que muchas variables están involucradas en él como: la *tasa de dosis* depositada, la presencia de oxígeno, así como la naturaleza de la radiación. Hay también una tendencia de estos materiales de presentar cierto tipo de recuperación o recombinación electrónica (*thermal annealing*) para seguir produciendo luz, horas o días posteriores de la exposición a la radiación. En algunos centelladores plásticos la degradación en el rendimiento de la luz para exposiciones acumuladas de rayos-gamma ha sido del orden de 10^3 a 10^4 Gy, que se manifiesta en la pérdida de la transparencia del material. Esta tendencia del centellador a volverse más opaco provoca que su eficiencia de detección decaiga. De acuerdo a los autores *G.F Knoll, K.A Bastidas y C. Zorn* estos cambios en la medición de la emisión de luz y de sus propiedades ópticas pueden ser debidos al decremento del rendimiento de la luz causado por daño químico ionizante en la componente fluorescente del material, o también pueden ser debidos en la re-transmisión de luz ocasionada por la creación de centros de absorción óptica entre sus moléculas [25,30,35].

1.7.1 Centelladores BC-404 y BC-422

Los materiales plásticos seleccionados como centelladores en nuestro estudio de resolución temporal son: *BICRON 404 (BC-404)* y *BICRON 422 (BC-422)* los cuales son manufacturados con una matriz base de “*PVT*” mostrada en la Figura 12, de acuerdo a los fabricantes *SAINT-GOBAIN®* y *BICRON®* [29,36,37,38].

El polímero base ,“*PVT*”, de dichos materiales es producido tras la ruptura del doble enlace del grupo funcional vinilo $R - CH = CH_2$ contenido en el compuesto orgánico

4-Vinil-tolueno, cuya estructura molecular se ilustra en la Figura 20, dejando libre un electrón de dos átomos de carbono, permitiendo su subsecuente polimerización.

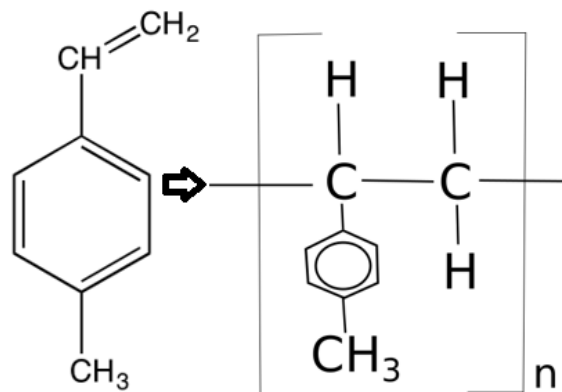


Figura 20. Diagrama de la transición molecular del monómero 4-Vinil-tolueno (izquierda) a polímero “ PVT “ a través de la ruptura del doble enlace del grupo vinilo (alqueno) y su consecuente polimerización.

El desempeño del “ PVT “ ha sido superior al “ PS “ y al “ PMMA ” en cuanto a las propiedades de transmisión de luz [39], además es prudente evaluar el costo de dicho centellador plástico (\$2000dls. por un detector grande de “ PVT “ con dimensiones de 3.8cm x 36 cm x 173 cm, en comparación a \$6000dls. por un detector de 5cm x 10cm x 41 de “ Na(Tl) “) [40,41]. El desempeño de las propiedades lumínicas sobre centelladores orgánicos, son las razones primordiales por las cuales se eligió simular materiales centelladores basados en “ PVT “; *ya que* si la simulación arrojase resultados favorecedores en cuanto a resolución temporal se refiere, su fabricación sería no solo posible sino rentable.

Ambos materiales a simular, BC-404 y BC-422, comparten ciertas características generales, además de la base polimérica con la que se encuentran fabricados. Algunas de las propiedades relevantes que dichos materiales tienen en común, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades en común del plástico centellador BC-404 y BC-422 proveídos por Saint-Gobain Crystal®. Obtenido de [36,37]

Centelladores con propiedades en común	BC-404 & BC-422
Base polimérica	PVT
Densidad (g/cm^3)	1.032 (Ligeramente superior a la del agua)
Coef. de expansión térmica. (por cada °C, <67°C)	7.8×10^{-5}
Índice de refracción	1.58 (cercano al del vidrio ≈ 1.5)
Solubilidad	Soluble en disolventes aromáticos, clorados, acetona, etc. No soluble por agua, ácidos diluidos, alcoholes inferiores, bases, grasa o fluidos de silicona pura.

1.7.2. Centellador BC-404

El centellador *BC-404* es ampliamente usado en forma de láminas delgadas para detección de partículas *alfa* y *beta*. Sus principales aplicaciones se desempeñan en estudios de *conteo rápidos de eventos (fast counting)*. Dicho material tiene una constante de tiempo $\tau = 1.8 \text{ ns}$ (Ecuación 1.3.4), además, este plástico centellador ha sido reportado por fabricantes y autores con una luz de salida del 68% respecto del antraceno. Este material centellador posee una longitud de onda máxima de emisión de 408 nm, como se observa en el espectro de la Figura 21, el cual se encuentra cerca de una *onda larga de emisión UV* [36,41,42].

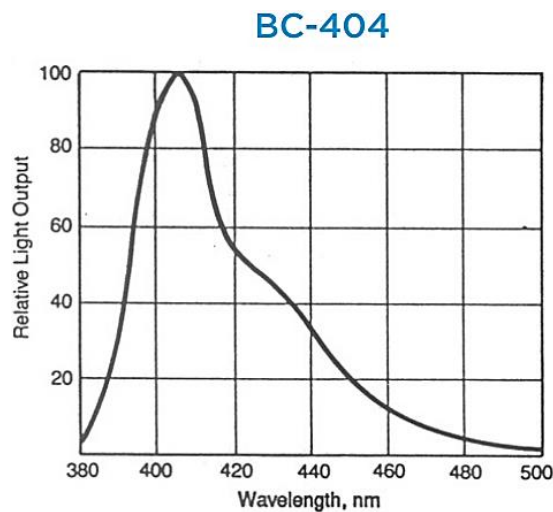


Figura 21. Gráfica de la curva del pico de emisión del centellador BC-404. Obtenida de Saint-Gobain Crystals® [36].

1.7.3. Centellador BC-422

Por otro lado, el material centellador *BC-422* tiene una constante de tiempo $\tau = 1.6 \text{ ns}$ (Ecuación 1.3.4), la cual es menor a la del material BC-404, haciendo su diseño particularmente útil para aplicaciones de *tiempo ultra-rápido (ultra-fast timing)* y de *conteo ultra-rápido (ultra-fast counting)*, es decir, altas tasas de conteo de eventos coincidentes [43]. Esto implica que el tiempo que emite fluorescencia es más corto al igual que el *ancho de pulso a media altura (FWHM)* de su correspondiente señal electrónica. Adicionalmente, este plástico centellador ha sido reportado con una luz de salida del 55% respecto del antraceno y una longitud de onda máxima emitida de 370 nm (Un poco más energética que la de BC-404, ilustrada en la Figura 22 y que está dentro del rango de emisión de *UV de onda larga*).

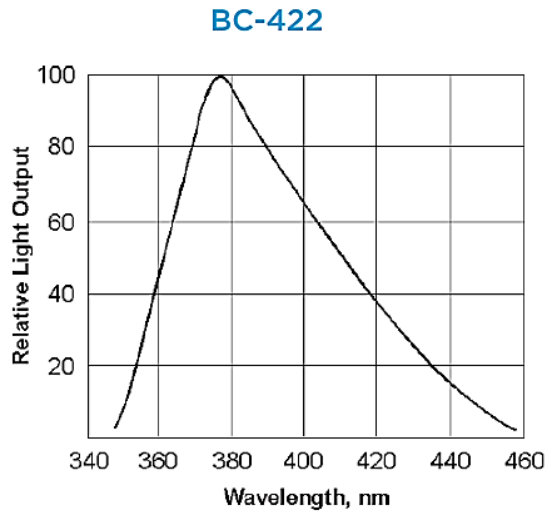


Figura 22. Gráfica de la curva del pico de emisión del centellador BC422. Obtenida de [37]

A continuación, en la tabla 2, se muestran diferencias de las propiedades y composición atómica referentes a los centelladores plásticos BC-404 y BC-422.

Tabla 2. Propiedades de centelladores BC-404 y BC- 422 proveídos por Saint-Gobain Crystals®. Obtenido de [36,37,41,44]

Propiedades	BC-404	BC-422
Respuesta de luz, % de Antraceno	68	55
Tiempo de decaimiento (ns)	1.8	1.6
FWHM (ns)	2.2	1.3
Longitud de onda máxima de emisión (nm)	408	370
No. de átomos de "H" por cm^3 ($\times 10^{22}$)	5.21	5.19
No. de átomos de "C" por cm^3 ($\times 10^{22}$)	4.74	4.71
Razón de átomos H:C	1.100	1.102
No. de electrones por cm^3 ($\times 10^{23}$)	3.37	3.34

La información de algunos parámetros mostrados anteriormente, como lo son: la base polimérica (PVT), el índice de refracción, la longitud de onda de emisión y la respectiva energía de cada fotón, etc., requieren ser introducidos como datos computacionales en los vectores que pertenecen los scripts de *GEANT4* para la simulación referida al estudio de resolución temporal.

1.8. Fotodetectores

En esta sección se hablará y profundizará sobre el cuarto elemento que conforma el arreglo a simular, la cual corresponde al fotosensor o fotodetector indicado en la Figura 1.

Un detector centellador posee un *transductor* el cual es un material centellante, encargado de transformar la radiación en luz visible. Esta luz visible se transforma en impulsos eléctricos mediante dos tipos de transductores: el tubo fotomultiplicador (*PMT*, *photomultiplier tube*) que utiliza el *efecto fotoeléctrico* y una serie de campos eléctricos para multiplicar los fotoelectrones hasta que alcancen una corriente eléctrica detectable. Y los SiPMs (*fotomultiplicadores de Silicio*) utilizan diodos sensibles a la luz que emiten corrientes proporcionales a la luz incidente [45]. Cada vez que una partícula, en nuestro caso muón, golpea el centellador se conoce con el nombre de *evento*. El fotosensor que se simuló en nuestro arreglo, cumple la función de contador de los fotones ópticos que se generan en la superficie del centellador cada vez que ocurre un *evento*. En este estudio se pretendió simular un SiPM (carente de la parte electrónica), el cual se encargará de la detección de los eventos. Afortunadamente para estudios de resolución temporal intrínseca no necesitamos simular dicha electrónica, ya que solo se requiere saber la velocidad de conteo de las partículas debido al acoplamiento del *centellador con el SiPM*. La parte electrónica es usada para el proceso de amplificación de la señal, la cual es independiente y posterior al estudio, por lo cual no es requerida. Sin embargo, por fines pedagógicos en esta sección del capítulo no solo se ahondará en las generalidades y funcionamiento del *SiPM*, sino que previamente se mencionará un dispositivo de tecnología previa a su existencia: el *PMT* o tubo fotomultiplicador. Pudiendo así, comparar mejor las características de ambos dispositivos, justificando el uso del SiPM en las simulaciones llevadas a cabo.

1.8.1. Tubos Fotomultiplicadores (PMTs)

Los PMTs (por sus siglas en inglés) hacen una imprescindible tarea en cuanto a detección de luz se refiere, dichos dispositivos son capaces de convertir las señales de luz que generalmente consisten en unos pocos cientos de fotones, a una corriente eléctrica de pulso, la cual es utilizable al no contener mucho ruido de señal añadido. En la Figura 23, se muestra una representación de un PMT, el cual es un recipiente al alto vacío, el cual realiza la conversión de la luz de los fotones incidentes a una señal electrónica medible para su posterior procesamiento. Primero los fotones ópticos generados en la superficie del

centellador interactúan en el *fotocátodo*, el cual es capaz de absorber la luz y transferir la energía “ $h\nu$ ” a un electrón dentro del material *fotoemisor* del que está constituido, esto con la finalidad de provocar una migración electrónica hacia la superficie del material. Si el electrón en esta etapa tiene suficiente energía, este puede superar la barrera de potencial que existe siempre entre la interfaz de un material y el vacío. Los electrones emitidos hacia el vacío dentro del tubo por el fotocátodo (el cual funciona gracias al *efecto fotoeléctrico*), son dirigidos a una serie de electrodos llamados *dinodos* los cuales están sometidos a una diferencia de potencial (50-100 volts) más positivo que el anterior. Los *dinodos* tienen una cubierta de materiales de *afinidad electrónica negativa*, como óxido de berilio “*BeO*” o antimonio de cesio “*CsSb*” los cuales son capaces de desprender varios electrones secundarios tras ser impactados por electrones de alta energía [45,46]. La sensibilidad de un fotocátodo puede ser medida a través de la eficiencia cuántica (*QE*), la cual es una unidad relevante en el conteo de luz debido a centelleo. Dicha unidad está definida como:

$$QE = \frac{\text{número de fotoelectrones emitidos}}{\text{número de fotones incidentes}} \quad (1.8)$$

la eficiencia cuántica debería ser del 100% para un fotocátodo ideal, pero en la práctica los fotocátodos han reportado una eficiencia cuántica máxima del 25%.

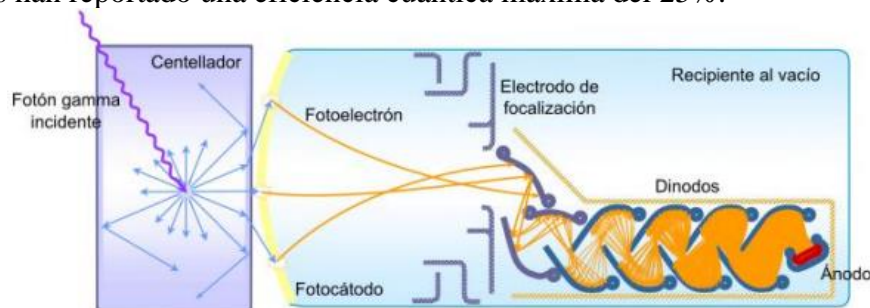


Figura 23. Esquema de las partes interiores que componen un PMT acoplado a un centellador. 1) Incidencia de radiación en el centellador. 2) Generación de fotones ópticos. 3) Llegada de los fotones al fotocátodo y generación de electrones. 4) Adentramiento de los electrones en el interior del PMT, direccionados a los dinodos por un campo eléctrico producido por el *electrodo de focalización*. 5) Atracción cada vez más intensa de electrones debido al incremento de la diferencia de potencial entre cada dinodo, conllevando a la producción de electrones en cascada. 6) La cascada de electrones secundarios arriban al ánodo como una corriente eléctrica permitiendo registrar y procesar los eventos como datos. Obtenido de (Crespo, 2011,) [47].

El PMT a pesar de estar al vacío, está también sometido a un campo eléctrico encargado de acelerar y dirigir los electrones del *cátodo* (0 volts/tierra) hasta el *ánodo* (1.5 a 2 keV) pasando a través de los *dinodos* con una diferencial ascendente a través de divisores de voltaje que permiten la aceleración y la producción de electrones en cadena, convirtiéndose en una corriente eléctrica que al llegar a al *ánodo* pasa por un *filtro capacitivo* que aplanan el rizado de la señal y disminuye el ruido del pulso. Finalmente, las señales eléctricas de cada evento se registran y procesan en un ordenador.

1.8.2 Fotomultiplicadores de Silicio (SiPMs)

Los fotomultiplicadores de silicio (SiPM, por sus siglas en inglés) se clasifican como detectores de *estado sólido*. El silicio “Si”, átomo *tetravalente* del que están constituidos principalmente los SiPM, cuya estructura cristalina es mostrada en la Figura 24. Los SiPM están formados de semiconductores, por lo cual poseen una banda de valencia y una banda de conducción las cuales son separadas por una banda prohibida/*gap* de pequeña energía, observada en la Figura 25. Por lo anterior mencionado, cuando un fotón óptico emitido por el centellador interactúa con la superficie del SiPM, los electrones de la banda de valencia pueden ser fácilmente promovidos a la banda de conducción. Algunos fotones poseen suficiente energía para excitar los electrones que se encuentran en su trayectoria, lo que al aplicar una diferencia

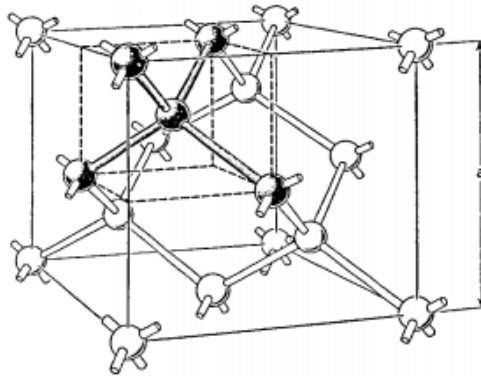


Figura 24. Estructura de una red cristalina tipo diamante, propia del diamante, el silicio *Si* y el germanio “*Ge*”. Obtenida de [48].

de potencial determinada, su campo eléctrico asociado es capaz de coleccionar y acelerar dichos electrones formando una corriente eléctrica medible y amplificarla. El proceso de excitación no solo promueve al electrón a la banda de conducción, sino que también deja una vacancia en la banda de valencia (hueco) (Knoll,2010).

Esta combinación llamada *par electrón-hueco* tiene una probabilidad de ser generada térmicamente a través de la siguiente relación:

$$P(T) = CT^{3/2}\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1.9)$$

T= temperatura en grados Kelvin

E_g = valor de la banda prohibida de energía en eV (Energy Gap, por sus siglas en inglés)

k = constante de Boltzmann ($8.617 \times 10^{-5} \frac{eV}{K}$)

C = constante de proporcionalidad característica del material.

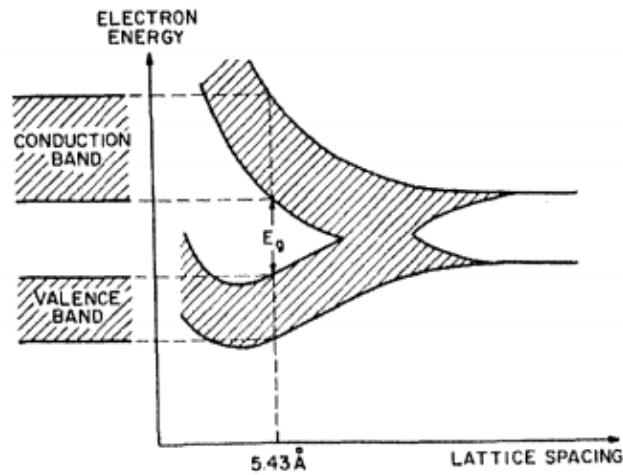


Figura 25. Bandas de energía del silicio. Obtenida de [48].

Los materiales semiconductores que tienen el mismo número de electrones que huecos se llama *semiconductores intrínsecos*. Una forma de disminuir el tamaño de la " E_g " e incrementar la corriente generada es aumentar dichos portadores de carga a través de dopar al material. Si se dopa la red cristalina de silicio con impurezas de un elemento *trivalente* o *pentavalente* [49], la migración de *pares hueco-electrón* comienza a generarse y movilizarse en forma de *avalancha*, amplificando la corriente [50]. Estos dispositivos, que son relativamente modernos (se comenzaron a desarrollar en 1993), consisten de $\sim 10^4$ *diodos de avalancha* (*APD, avalanche photodiode*) que conforman el área de detección. Cada celda mide entre un rango $25\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$ de longitud como muestra la Figura 27 [51].

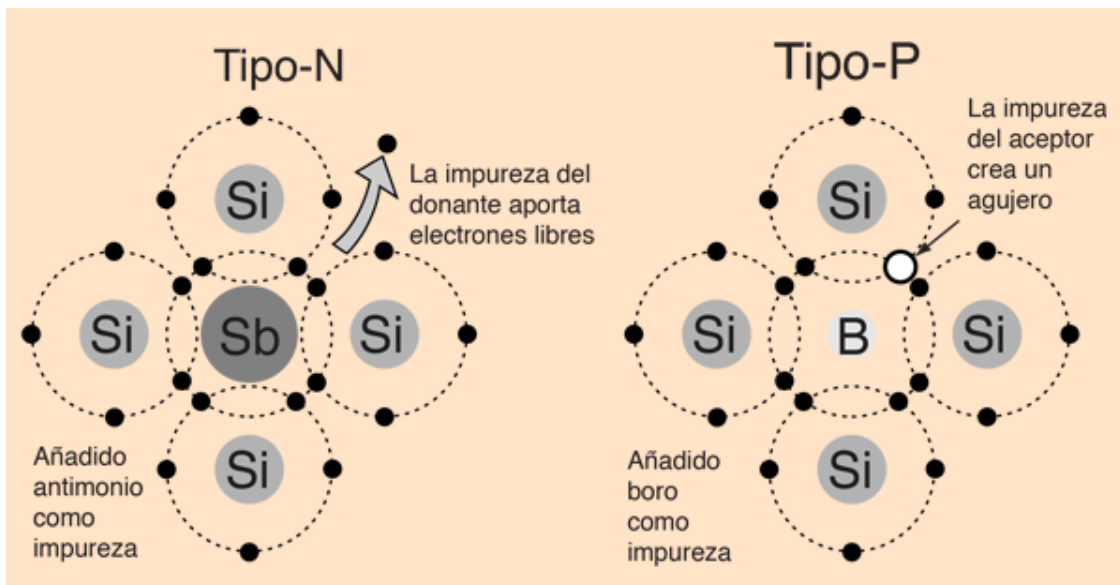


Figura 26. Semiconductor de Si dopado con material trivalente y pentavalente. Obtenida de [49].

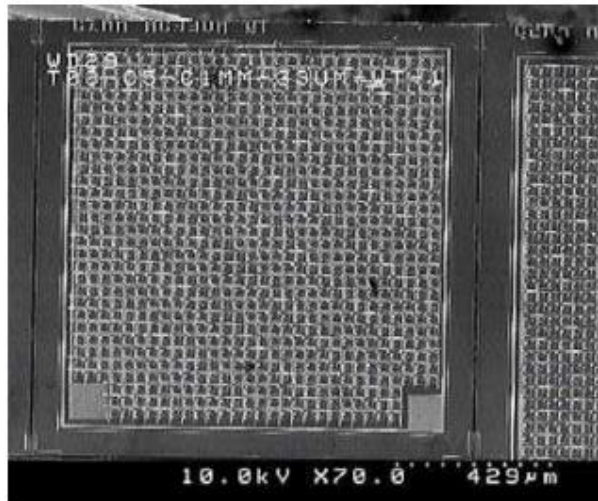


Figura 27. Vista superior de una imagen micrográfica de un SiPM, donde se pueden apreciar las celdas que lo conforman. Las dimensiones del SiPM son $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Obtenido de [50].

La modernidad, en la mayoría de los casos, lleva a innovar lo que ya existe en términos de ciencia y tecnología; “Hacer más con menos”, que significa: mejorar los rangos de operación y precisión de los dispositivos, en este caso nos referimos a los fotodetectores, utilizando diferentes materiales y diseños que permiten experimentar, explorar y mejorar sus características sin incrementar significativamente sus costos, y así incrementar su accesibilidad.

Uno de los dispositivos más utilizados para detectar fotones como se comentó en secciones anteriores de este capítulo, son los tubos fotomultiplicadores (*PMTs*), que surgieron en la década de 1930 y casi cien años después se utilizan todavía en áreas como microscopía, medicina, física de altas energías, partículas, etc.; ya que poseen una combinación de bajo ruido electrónico, un gran ancho de banda y una alta ganancia que permite la detección precisa de un solo fotón. Desafortunadamente en comparación con los fotomultiplicadores de silicio (*SiPM*), los *PMTs* tienen un voltaje operativo bastante alto del orden de *keV*, una baja eficiencia cuántica “*QE* (por sus siglas en inglés)” (ecuación 1.8) entre el 5% y 25% con un pico de emisión máxima de 530nm (verde) y los costos de fabricación generalmente son más altos. Por otro lado, los “*SiPM*” al estar hechos de un elemento tan abundante como el silicio, permiten bajos costos de fabricación en comparación con los tubos de vacío, altos umbrales de daño, bajo voltaje operativo (60 volts), sensibilidad dentro del espectro infrarrojo, una alta eficiencia (de 50% y algunos casos de hasta 60%), insensibilidad a campos magnéticos y fácil portabilidad [52,53,54]. Los fotocátodos de los *PMTs* al tener una superficie grande, fuerza al usuario a utilizar dimensiones grandes de centellador o varios centelladores, con la intención de que cubran la superficie del fotocátodo y aprovechar así toda su área, lo cual no ocurre con los *SiPMs* al tener dimensiones de fabricación pequeñas y variables. Es por las ventajas mencionadas anteriormente, que se considera pertinente simular arreglos de centelladores plásticos acoplados a *SiPM* y no a *PMTs*, analizar los resultados de resolución temporal de este detector “centellador-*SiPM*” y evaluar la plausibilidad de su fabricación.

La estructura que emulará el SiPM en este estudio se constituye de una placa rectangular compuesta de dióxido de silicio (SiO_2), colocada sobre la superficie del centellador a la cual nos referiremos de ahora en adelante como *Score*.

1.9 Resolución Temporal Intrínseca

El objetivo específico de este estudio es la medición de la *resolución temporal intrínseca* del sistema de fotodetección simulado.

La resolución temporal (RT) en un experimento puede ser afectada por muchos factores como lo son: la geometría del centellador, su respuesta de luz (Sección 1.6), su longitud de atenuación [25] y su constante de decaimiento (Ec. 1.5), su eficiencia en la captación de luz, el nivel de ruido y forma de pulso de la electrónica, etc. [55]. La RT se define como la capacidad que tiene un sistema de detección para distinguir como eventos diferentes (colisiones de partículas, radiación cuantizada), aquellos que se han producido con un intervalo de tiempo muy pequeño entre los mismos. En un experimento la caracterización de la resolución temporal de un detector consiste en la medición de los tiempos de llegada de los fotones ópticos al fotosensor (PMTs o SiPMs) posterior a ser generados en la superficie del centellador por la interacción de una partícula primaria [53,55,56].

En este estudio que confiere la realización de simulaciones de arreglos de detectores con distintos tamaños y plásticos centelladores, la RT intrínseca se obtuvo al registrar los tiempos de llegada de los fotones en la superficie del centellador al área sensible o *Score* que emula al SiPM. La resolución temporal intrínseca es una propiedad propia del material o configuración establecida, en este caso la resolución temporal intrínseca es dependiente en totalidad de la configuración dada por la unión centellador-área sensible de fotodetección.

Capítulo 2

Metodología

2.1. GEANT4

Una tendencia actual en la ciencia y la tecnología es el aumento del uso de simulaciones computacionales previas a la experimentación con detectores de radiación [57]. Justamente dicha simulación y su evolución ha desempeñado un importante rol en diversos campos de las ciencias físicas e ingeniería. GEANT4 (Geometry and Tracking) es un conjunto de herramientas computacionales que se emplean para la simulación de la interacción de radiación y paso de las partículas a través de la materia. Estas herramientas van desde diseño de geometrías, bibliotecas de materiales para simular, hasta bibliotecas de partículas elementales y no elementales que, al interactuar con la materia, nos permite medir variables como la trayectoria de la partícula, su longitud de onda, la energía depositada, tiempos de llegada de partículas, etc.

Actualmente hay variedad de software de simulación Monte Carlo que nos permiten simular interacción de radiación con materia como: *EGS* (Electron Gamma Shower), *PENELOPE* (Penetration and ENergy LOss of Positrons and Electrons) , *FLUKA* (FLUktuierende KAskade), etc.[58], sin embargo, a los 20 años de su primera publicación, *GEANT4* ha tenido diversas actualizaciones , lo que le ha permitido adaptarse a lo largo del tiempo a las necesidades de los usuarios, lanzando más herramientas como GATE (GEANT4 Application for Tomographic Emission), convirtiéndose en un motor de simulación adecuado para simular experimentos de altas energía en *LHC*, *ESA*, *la NASA* permitiendo diseñar y probar naves espaciales, calcular la dosis de radiación recibida por astronautas y dispositivos electrónicos [57].

También es usado en aplicaciones de *física médica* como la *microdosimetría* y *seguridad radiológica*. La accesibilidad de su código abierto a permitido a una gran diversidad de usuarios extender sus aplicaciones a dominios como ciencias de los materiales, bioquímica y ensayos no destructivos [57,59].

2.2 Metodología de las Simulaciones

Utilizando del software GEANT4 se pudieron simular los elementos básicos que forman parte del sistema de detección en este estudio: haz de muones, centellador plástico; y el SiPM como fotodetector no se simuló, se emuló. Se habló de estos elementos individualmente en el Capítulo 1. El arreglo básico de detector con centellador acoplado a 2 SiPMs que se simulará se ilustra en la Figura 28.

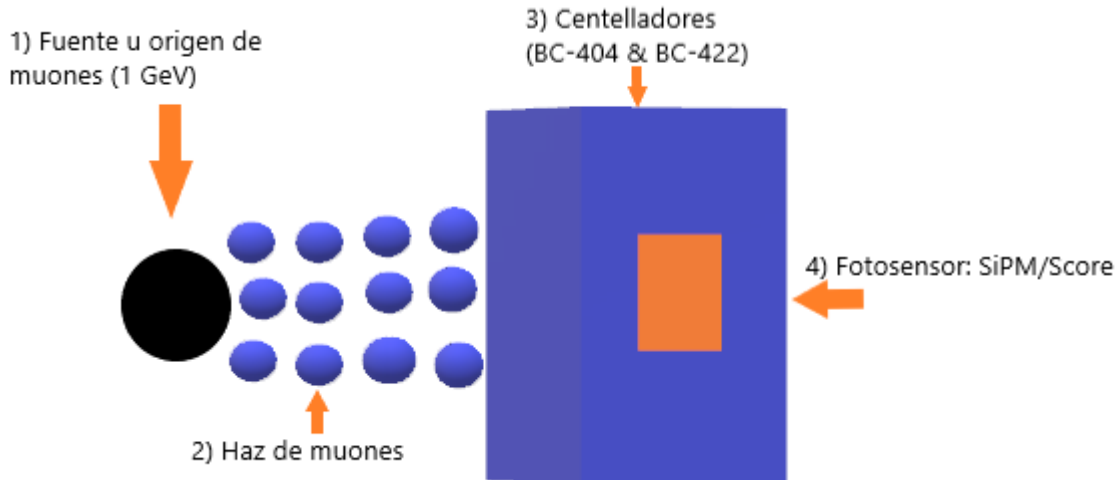


Figura 28. Representación gráfica del sistema de detección con acoplamiento centellador-SiPM que se simuló en este estudio, enumerando cada una de sus partes: 1) Fuente/Origen de muones, 2) Haz de muones, 3) Centelladores a simular y 4) SiPMs/Scores como fotosensores.

El ambiente en el sistema de detección está formado por aire compuesto de 70% de nitrógeno “N” y 30% de Oxígeno “O”, ya que se tomó una carpeta de archivos de GEANT4, llamada OpNovice, la cual es usada particularmente para la generación y transporte de fotones ópticos [60]. La determinación del ambiente se lleva a cabo programando y compilando un código de C++ denominado “OpnoviceDetectorConstruction.cc”, algunas líneas de este programa son mostradas en el recuadro del código 1 (Todo el código del script en C++ se puede encontrar en el Apéndice D).

```
// Air

G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", z=7 , a=14.01*g/mole);
G4Element* O = new G4Element("Oxygen" , "O", z=8 , a=16.00*g/mole);
G4Material* air = new G4Material("Air", density=1.29*mg/cm3, nelements=2);

air->AddElement(N, 70.*perCent);
air->AddElement(O, 30.*perCent);
```

Código 1. En estas líneas de código se establece el ambiente del que está rodeado nuestro sistema de detección. A través del comando “G4Element” se convoca el elemento con el cual formaremos , introduciendo en los argumentos de esa función: el nombre en formato “string” y el nombre del elemento, su abreviación, su número atómico “z” y su peso molecular en g/mol .. A través del comando G4Material convocamos al aire, formando de O y N , especificando su densidad en g/cm^3 y número de elementos representado por el argumento “nelements” . Su porcentaje presente en el compuesto está definido en el comando air-> AddElement (Abreviación de elemento, %).

El primer y segundo componente en el arreglo de detección son la fuente/origen de radiación y el haz de partículas. Particularmente en este estudio se colocó un punto de origen de los muones para interactuar con los plásticos centelladores (BC-404 y BC-422) en diferentes configuraciones con SiPMs. Se programó que los muones se generaran con una energía de 1 GeV (energía promedio de los muones presentes de en los rayos cósmicos), con la restricción de no presentar reacciones de decaimiento en otras partículas (Ecuaciones 1.3.4 y 1.3.5). Dicho punto donde se originan los muones fue posicionada a 1 mm de los plásticos centelladores, con la finalidad de que los muones conservaran lo mayor posible su energía y reducir la probabilidad de desviar su trayectoria hacia el centellador. El haz de muones fue configurado para interactuar de tres formas distintas con el centellador como se ilustra en la Figura 29.

Los plásticos centelladores BC-404 y BC-422 se simularon a base de una matriz de *PVT* (sección 1.8) el cual es proveído por una biblioteca de materiales pertenecientes al National Institute of Standards And Technology (*NIST*), la cual es especificada en GEANT4, a través de introducir: ("*G4_PLASTIC_SC_VINYLTOLUENE*") en el argumento de la función *G4Material* Bc404*, la cual es encargada de tomar los datos necesarios para simular el material polimérico a través de la biblioteca de *NIST*. También se definieron como elementos de vectores computacionales, la energía de los fotones ópticos (*photonEnergyBc404*), emitidos por cada centellador, así como su respectivo índice de refracción (*RINDEX_Bc404*), $n = 1.58$, del material polimérico (*PVT*). Lo anterior se muestra desarrollado computacionalmente en el recuadro del Código 2, descrito a continuación:

```

//// FOR BC404 ///
/*
  G4double photonEnergyBc404[] =
  {2.479*eV, 2.53*eV, 2.583*eV, 2.637*eV, 2.695*eV, 2.755*eV, 2.81*eV, 2.883*eV, 2.952*eV, 3.024*eV, 3.0613*eV, 3.099*eV,
  3.138*eV, 3.179*eV, 3.262*eV};
*/
//// FOR BC422 ///
G4double photonEnergyBc404[] =
{2.701*eV, 2.818*eV, 2.883*eV, 2.952*eV, 3.077*eV, 3.10*eV, 3.179*eV, 3.246*eV, 3.28*eV, 3.332*eV, 3.36*eV, 3.430*eV, 3.454*eV,
3.522*eV, 3.565*eV};
//////////
const G4int nEntries404 = sizeof(photonEnergyBc404)/sizeof(G4double);
G4NistManager* nistManager = G4NistManager::Instance();
G4Material* Bc404 = nistManager->FindOrBuildMaterial("G4_PLASTIC_SC_VINYLTOLUENE");
G4double RINDEX_Bc404[] = {1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58};

```

Código 2. En estas líneas de código se establecen algunos de los parámetros requeridos para la construcción de los materiales BC-404 y BC-422. Se declara los elementos de matriz de la energía de los fotones ópticos emitidos por ambos materiales. Con el comando *G4NistManager* es posible acceder a una biblioteca de materiales para configurar con el comando *G4Material* la base de *PVT* del que están formados los centelladores. *G4doubleRINDEX_Bc404* declara una variable doble que tiene definido como elementos de matriz un índice de refracción fijo igual a $n=1.58$.

En GEANT4 es complicado simular electrónica [53], por lo cual se utilizó un *área/volumen de prueba* para emular el SiPM, denominada *Score*. En él se lleva a cabo el conteo y el tiempo de vuelo (TOF) de las partículas secundarias (*fotones ópticos en este estudio*), generadas por una partícula primaria (*muones en este estudio*). A continuación, se muestra parte del código de GEANT4, en el recuadro del código 3, correspondiente a la declaración del material y peso molecular del dióxido de silicio (SiO_2) con el que se emuló la *placa de cuarzo/Score*.

```
//Quartz
a = 28.09*g/mole;
G4Element* elSi = new G4Element("Silicon", "Si", z=14., a);
G4Material* quartz = new G4Material("Quartz", density=2.200*g/cm3, nelements=2);
quartz->AddElement(elSi, 1);
quartz->AddElement(O, 2);
```

Código 3. Estas líneas de código declaran a través del comando G4Element el elemento de Si, indicando entre los argumentos de su función su nombre en formato *string*, abreviatura del elemento, número atómico “z” y peso molecular en $\frac{g}{mol}$. Con el comando G4Material se construye el material de cuarzo formado por dióxido de silicio (SiO_2), indicando los argumentos de su función: su nombre en formato de *string*, su densidad en (g/cm^3) y el número de elementos que lo conforman.

Las paredes de dicho volumen se declararon para que cumpliesen con la condición de frontera de que el **centellador** sea una **superficie 95% reflejante** y los **Scores** con una **superficie 0 % reflejante y 100% absorbente**; para asegurar que los fotones ópticos que llegan a ella sean contados *una sola vez*.

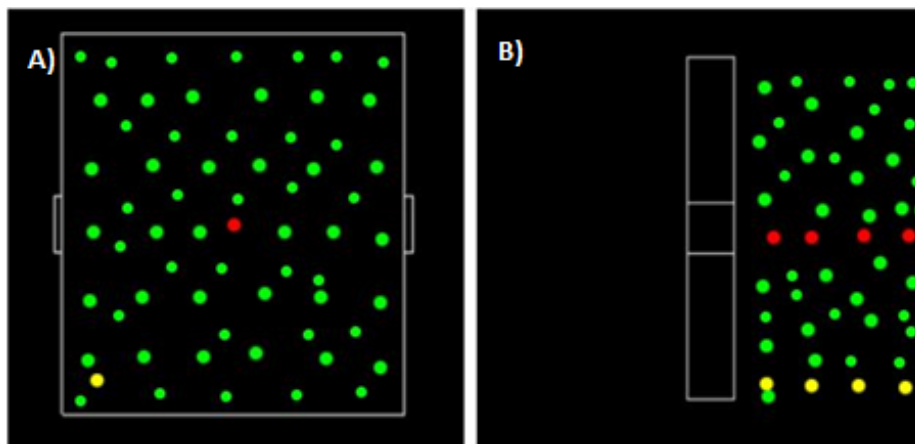


Figura 29. Ilustración representativa de la geometría $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ simulada en Geant4, correspondiente a un centellador de plástico acoplado a dos SiPMs ubicados en los lados centrales. Inciso A) geometría vista desde el frente. Inciso B) la misma geometría rotada 90 grados. Los puntos verdes representan el haz de muones distribuido aleatoriamente sobre su superficie, los puntos rojos corresponden al haz dirigido al centro y en amarillo, el haz dirigido a la esquina inferior izquierda.

Se llevaron a cabo *treinta simulaciones de arreglos de detectores* con geometría cuadrada, acoplados a *dos fotomultiplicadores de silicio (SiPMs) o “Scores”* ubicados en los lados centrales de los centelladores como se observa en la Figura 29. Estos conjuntos de simulaciones se realizaron considerando dos diferentes materiales centelladores *BC-404* y *BC-422*, y cambiando las dimensiones volumétricas de cada uno de estos ($100 \times 100 \times 20$, $50 \times 50 \times 10$, $40 \times 40 \times 5$, $20 \times 20 \times 5$, $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$) y la zona de la interacción de los muones sobre la superficie del centellador. Siendo enfático y claro, las treinta simulaciones de detectores se dividieron en dos, es decir, *quince simulaciones* para el material *BC-404* y *quince* para el *BC-422* respectivamente. La forma en la cual se llevó a cabo la organización de las simulaciones se muestra en el diagrama de la Figura 30.

El resultado de las simulaciones genera archivos de texto que proporcionan la siguiente información: *el número de evento, posición espacial de cada fotón: “x”, “y” y “z” en centímetros, su energía cinética en electronvolt, longitud de onda en nanómetros y su tiempo de llegada (TOF) al área sensible en nanosegundos.*

Para el tratamiento estadístico posterior a las simulaciones se utilizó el marco de programación denominado *ROOT (versión 6.21/01)*. Mediante este programa los tiempos de llegada (TOF) de los fotones ópticos fueron procesados evento por evento, para obtener una distribución de tiempo y posteriormente realizar un ajuste mediante una distribución de tipo Landáu, mostrados en la Figura 31. La media estadística (μ) de cada distribución de Landáu se refiere al TOF de los fotones en cada evento. El tomar todos los valores medios (μ) de los tiempos de llegada referidos a cada uno de los eventos, nos permite construir una nueva distribución con dichos datos, a través ajustar su histograma a una distribución *normal/gaussiana (G)* o a una distribución denominada *crystalball (CB)*. La desviación estándar (σ) de esta última distribución es precisamente el parámetro de resolución temporal intrínseca del acoplamiento *centellador-SiPM*, que se busca caracterizar.

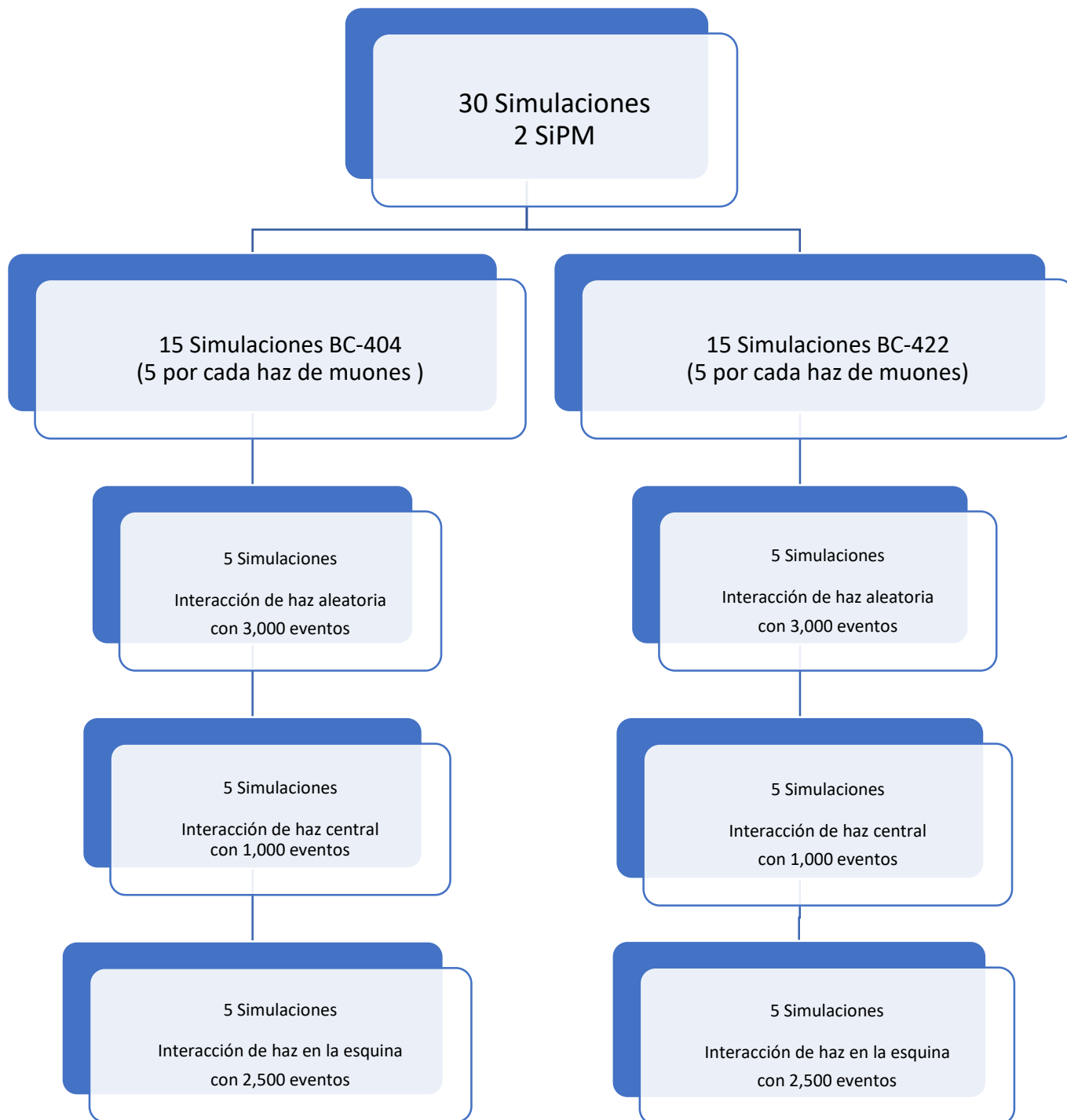


Figura 30. Mapa conceptual que muestra la organización de las simulaciones por: material centellador, dimensiones de volumen y configuración de haz. El texto “5 Simulaciones” se refiere a los 5 tamaños de volumen explicados previamente: (100x100x20, 50x50x10, 40x40x5, 20x20x5 y 20x20x3 mm³).

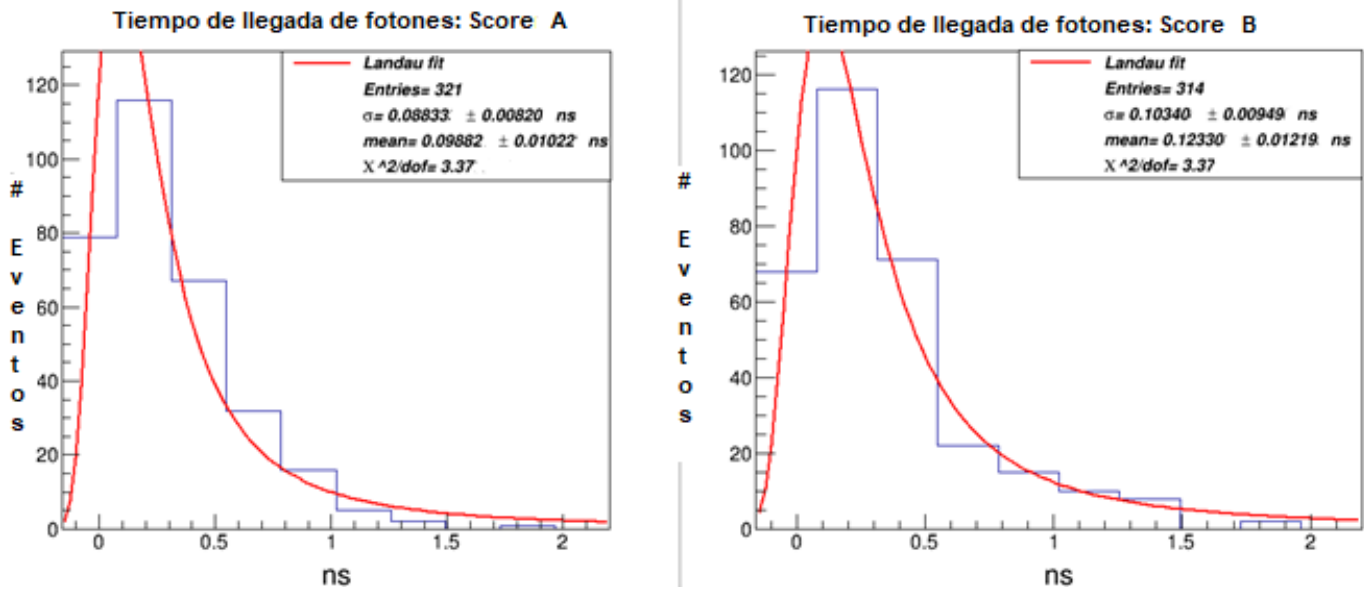


Figura 31. Ilustración de histogramas (líneas azules) ajustados a distribuciones Landáú (líneas rojas) pertenecientes a los datos registrados por los dos Scores colocados en el centellador. Dichos histogramas corresponden a los fotones ópticos contabilizados en el arreglo de detección $100 \times 100 \times 20 \text{mm}^3$, material BC-404, evento 500 de 1,000 y un haz de muones configurado a la esquina inferior izquierda del centellador. El parámetro “mean” situado en el recuadro, es la media de la distribución, las cuales se tomarán de todos los eventos para la construcción de una nueva distribución.

El número de eventos varió de acuerdo a la configuración de haz, para la interacción de haz dirigida al centro se programaron 1,000 eventos, para la interacción de haz en la esquina 2,500 y 3,000 para la interacción de haz aleatoria, como es mostrado en el diagrama de la Figura 30. Este aumento en la programación del número de eventos fue necesario para obtener una muestra estadística de fotones ópticos lo suficientemente grande para ser analizable. Esto es debido a que al estar posicionados los fotones en la esquina o en un punto arbitrario de la cara del centellador, pueden sufrir tantas desviaciones en su trayectoria que pudieran perder toda su energía cinética, imposibilitando su llegada al *score*, repercutiendo en menos entradas de datos. Es por esto que se aumenta el número de eventos para estos casos.

Todo lo anterior mencionado se llevó a cabo con la finalidad de poder cuantificar la *resolución temporal intrínseca* del sistema de detección en función de: el material centellador, sus dimensiones volumétricas y la zona de interacción del haz de muones con el plástico centellador.

Capítulo 3

Resultados y Análisis

En esta sección se presentarán los resultados estadísticos obtenidos posterior a haber analizado en ROOT los datos extraídos de las simulaciones para los detectores con 2 Scores con sus respectivas dimensiones, haces y materiales centelladores. Todas las distribuciones correspondientes a los arreglos, se pueden ver en el *Apéndice C*, al final de la Tesis.

3.1. Resultados y análisis 2 Scores: BC-404 vs BC-422

Después de haber tomado los tiempos promedios de llegada de los fotones de cada uno de los eventos programados para cada arreglo de detector, se creó un histograma en ROOT para cada uno ellos. Cada histograma se ajustaba a una distribución *G* o *CB*. La Figura 32, muestra un histograma ajustado a una curva *G* perteneciente al arreglo de dimensiones de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ e interacción de muones en la esquina inferior izquierda del centellador. En el recuadro de texto dentro del histograma se observan las siguientes leyendas:

*Gaussian Fit - Es el título del tipo de ajuste al que se someten los datos.

*Entries - Es el número de entradas del histograma, en este caso son los 2,500 promedios de los tiempos de llegada de los fotones ópticos, extraídas de las gráficas de Landáu.

* σ - Sigma es la desviación estándar medido en ns. , perteneciente al ajuste de distribución con su respectivo error. Este parámetro es la resolución temporal (RT)

*mean - μ es el promedio del ajuste medido en ns. , perteneciente a la distribución ajustada, con su respectivo error. Es el promedio de tiempo de llegada (TOF)

* χ^2/ndf - El valor del parámetro chi cuadrado, que ROOT, muestra normalizándolo al dividirlo entre ndf “number of degrees of freedom “o“ el número de grados de libertad”.

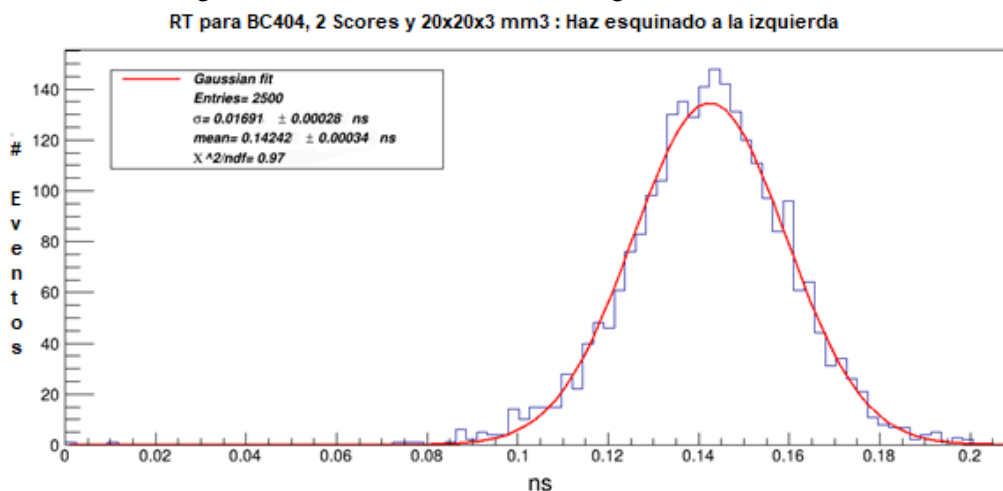


Figura 32. Distribución *G* formado por los promedios de cada distribución Landáu asociada a los tiempos de llegada de los fotones por cada evento. Esta distribución corresponde al arreglo de 2 Scores, centellador BC-422 con dimensiones de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ e interacción del haz de muones en la esquina inferior izquierda del mismo. Este histograma está constituido por todos los promedios de los tiempos de llegada de los fotones pertenecientes a los 2,500 eventos programados para dicha simulación. La sigma que aparece dentro del recuadro es la resolución temporal de dicho arreglo con su respectivo error.

Al momento de estar ajustando los datos de los histogramas a una distribución G, se observó que los histogramas de algunos de los arreglos poseían un comportamiento exponencial en uno de sus extremos. Este último tipo de histogramas pudieron ser ajustados a una distribución CB. La comparación de las distribuciones G y CB se puede observar en la Figura 33, en el recuadro de la izquierda se muestra un histograma ajustado a una distribución G perteneciente al arreglo con dimensiones $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, centellador BC-404 y haz de muones dirigido al centro del centellador. El recuadro de la derecha muestra un histograma ajustado a una distribución CB correspondiente al arreglo de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, centellador BC-422 y haz de muones distribuido aleatoriamente sobre la superficie del centellador.

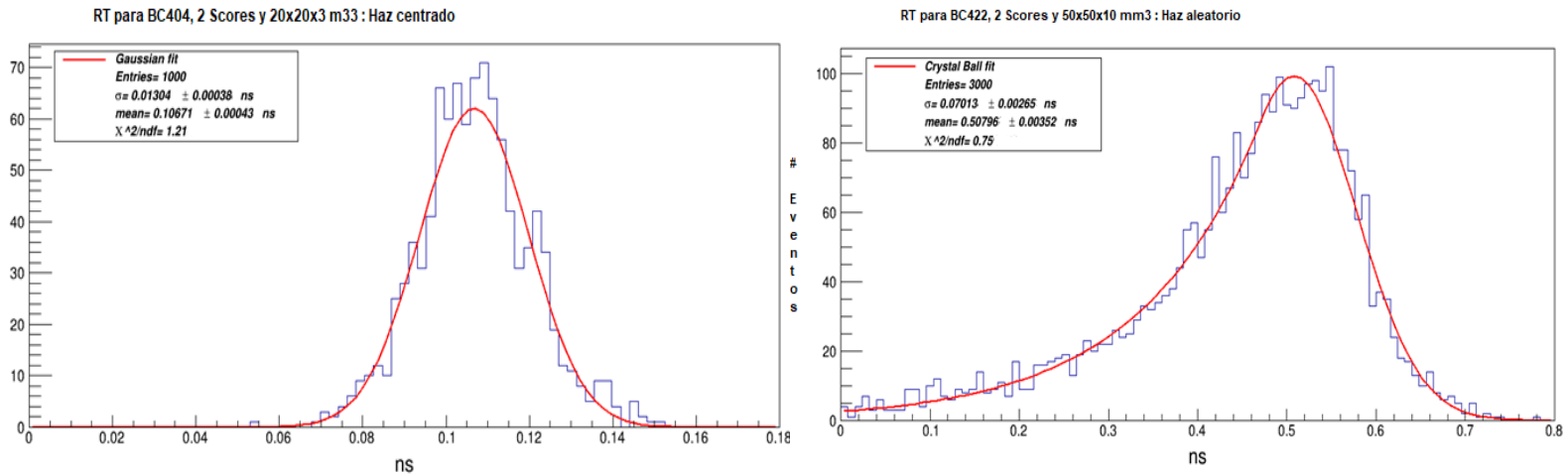


Figura 33. En el recuadro de la izquierda se muestra una distribución G correspondiente a un arreglo de 2 SiPM, $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, centellador BC-404 y haz de muones centrado. En el recuadro de la derecha se muestra una distribución CB correspondiente a un arreglo de 2 SiPM, $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$, centellador BC-422 y haz de muones distribuido aleatoriamente sobre el centellador.

Es claramente visible apreciar un sesgo hacia la derecha de la distribución correspondiente al haz aleatorio en comparación a la distribución para un haz dirigido al centro del centellador. El sesgo a la derecha o a la izquierda del comportamiento de los datos y su correspondiente ajuste a la distribución CB se dio en la mayoría de las simulaciones, siendo más recurrente en las distribuciones de las simulaciones correspondientes *al haz de muones distribuido aleatoriamente* sobre una cara del centellador y *al haz configurado hacia la esquina del centellador*. En los histogramas de arreglos con configuración de haz de muones dirigido al centro del centellador fue donde se hizo presente la distribución G. Esto es debido a que, una vez generados los fotones ópticos en el centro del centellador, el camino óptico que estos deben de recorrer, es equidistante para ambos scores sugiriendo cierta simetría en la distribución de sus tiempos de llegada, lo cual hace sentido con la característica simétrica que posee la distribución G en la frecuencia estadística de sus datos. Sin embargo, para los datos resultantes con *el haz de muones centrado* que se ajustaron preferentemente a una distribución CB y no G, es pertinente pensar que, a pesar de la equidistancia del camino óptico a los scores, en el trayecto a estos últimos los fotones pudieran tener una interacción

con otro fotón sufriendo una desviación en su trayectoria, modificando consecuentemente su energía y su TOF a alguno de los scores. El parámetro μ , de cada una de las distribuciones describe el TOF de los fotones a los scores y el parámetro σ es su respectiva desviación estándar como anteriormente se mencionó. Esta desviación estándar “ σ ”, que cuantifica estadísticamente que tan alejados están los datos de la media, sugiere la capacidad en resolución temporal que goza el detector de presentar los datos lo menos alejados posible de μ , es decir, mientras la σ tenga un valor menor, será equivalente a decir que el centellador tiene una mayor RT. Se trató de que los treinta distribuciones de los histogramas de cada simulación (las cuales son mostradas en el **Apéndice C**) fueran ajustadas con un parámetro χ^2/ndf con valor cercano a 1. Este parámetro es usado en lo que se denomina “*prueba de bondad de ajuste*”, la cual es una prueba de hipótesis donde se utiliza este parámetro como un *parámetro de correlación*, que sirve para verificar si los datos de una muestra ajustan a una determinada distribución de probabilidad. Es decir, mientras χ^2/ndf sea más cercano a 1, significa que los datos del histograma tienen una alta correlación con el ajuste ejercido (en estos caso G o CB), al igual que sus respectivos parámetros μ y σ . Teniendo el parámetro $\frac{\chi^2}{ndf} \sim 1$ para la mayoría de los ajustes, aseguramos que μ y σ “o”, TOF y RT en este estudio, tengan un valor fidedigno estadísticamente hablando, que justifica el compartir estos resultados. Una vez que fueron ajustados todos los histogramas de los tiempos de llegada de los fotones a distribuciones de probabilidad G o CB, fueron graficados en grupos de cinco, correspondiendo a la variación de sus 5 dimensiones volumétricas, su material centellador BC-404 o BC-422 y su respectiva interacción de haz, como se muestran en las Figuras 34, 35,36,37,38 y 39.

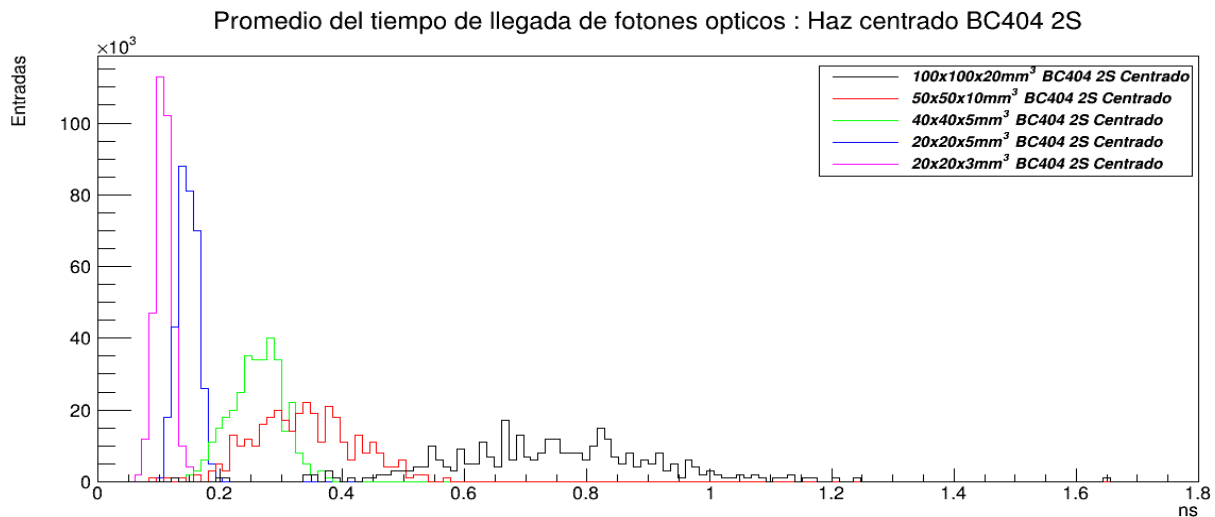


Figura 34. Histogramas de los datos correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-404 e interacción al centro del centellador. El Eje X es el tiempo de llegada en nanosegundos (ns.) y eje Y son las entradas o número de fotones ópticos registrados.

Promedio del tiempo de llegada de fotones opticos : Haz centrado BC422 2S

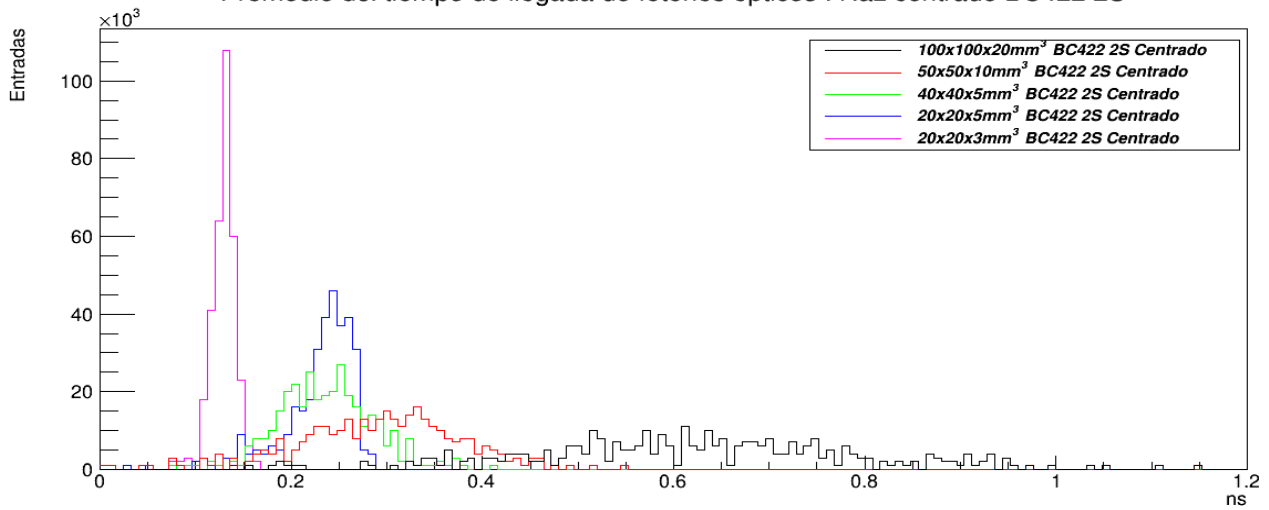


Figura 35. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-422 e interacción de haz al centro del centellador.

Promedio del tiempo de llegada de fotones opticos : Haz Esquinado BC404 2S

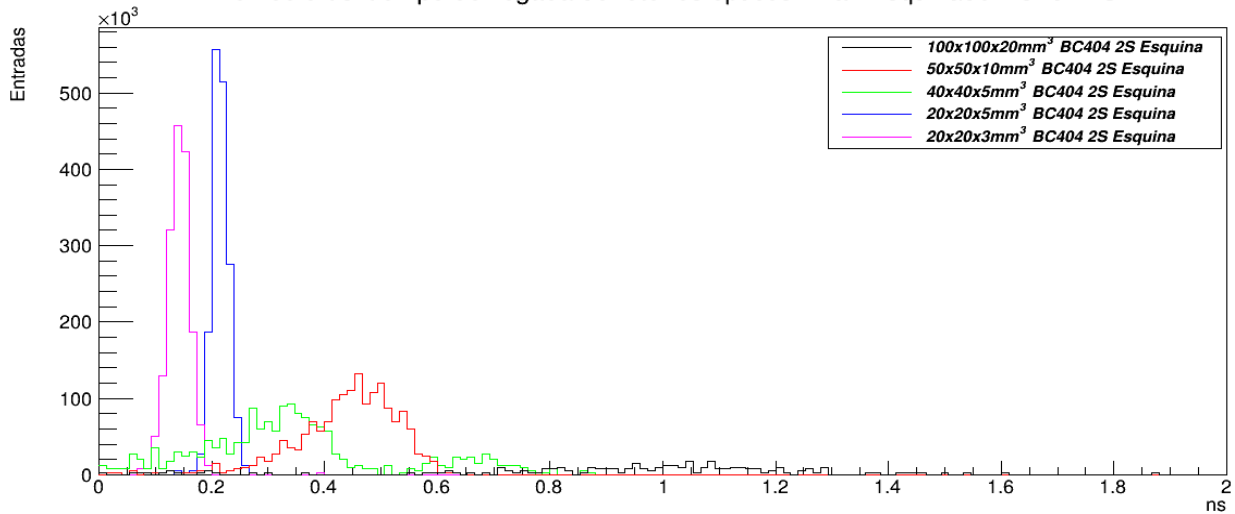


Figura 36. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-404 e interacción de haz en la esquina izquierda del centellador.

Promedio del tiempo de llegada de fotones opticos : Haz Esquinado BC422 2S

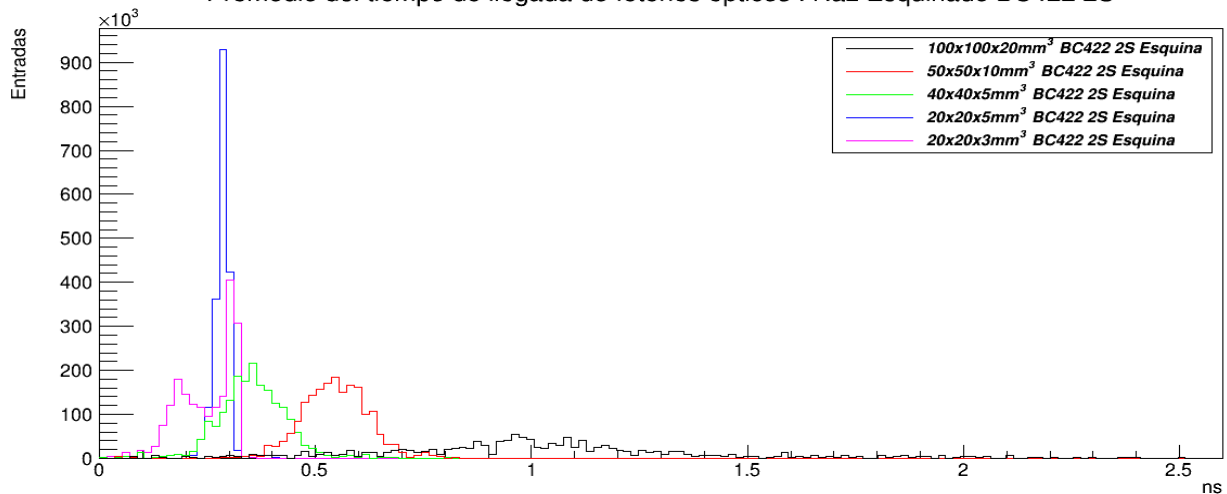


Figura 37. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-422 e interacción de haz en la esquina izquierda del centellador.

En las Figuras 34 y 35 se muestran los histogramas de los tiempos de llegada de las simulaciones asociados a 2 Scores, interacción de haz centrada con materiales BC-404 y BC-422 respectivamente. De color negro se puede observar el histograma del arreglo con dimensiones $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$, de color rojo el de $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$, en verde $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$, en azul marino $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ y en color magenta el arreglo de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$. Se observa que, a medida que las dimensiones del centellador van siendo más pequeñas, el dominio que abarcan los datos de su histograma se va reduciendo, habiendo cada vez mayor acumulación de datos en el centro de su distribución, propiciado a que el pico máximo de cada histograma se encuentre cada vez más cerca del origen, es decir, el pico máximo más alejado del origen corresponde al histograma del centellador más grande, y el más cercano para el centellador más chico. Para los histogramas mostrados en las Figuras 36 y 37, correspondientes a los materiales BC-404 & BC-422 e interacción de haz en la esquina izquierda del centellador, se puede observar la rotura de la tendencia del pico máximo, comentada anteriormente. Los histogramas correspondientes a los arreglos con dimensiones de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ (color magenta) para ambos centelladores se salen de dicho patrón. Por otro lado, el primer histograma en color magenta (centellador $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ y material BC-404) con interacción en la esquina muestra un pico con menor altura al del arreglo $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ (azul); el histograma magenta correspondiente al centellador $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ y material BC-422 se sale de tendencia porque el pico máximo tiene una altura menor y en un tiempo mayor al de su sucesivo arreglo con dimensiones de $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$.

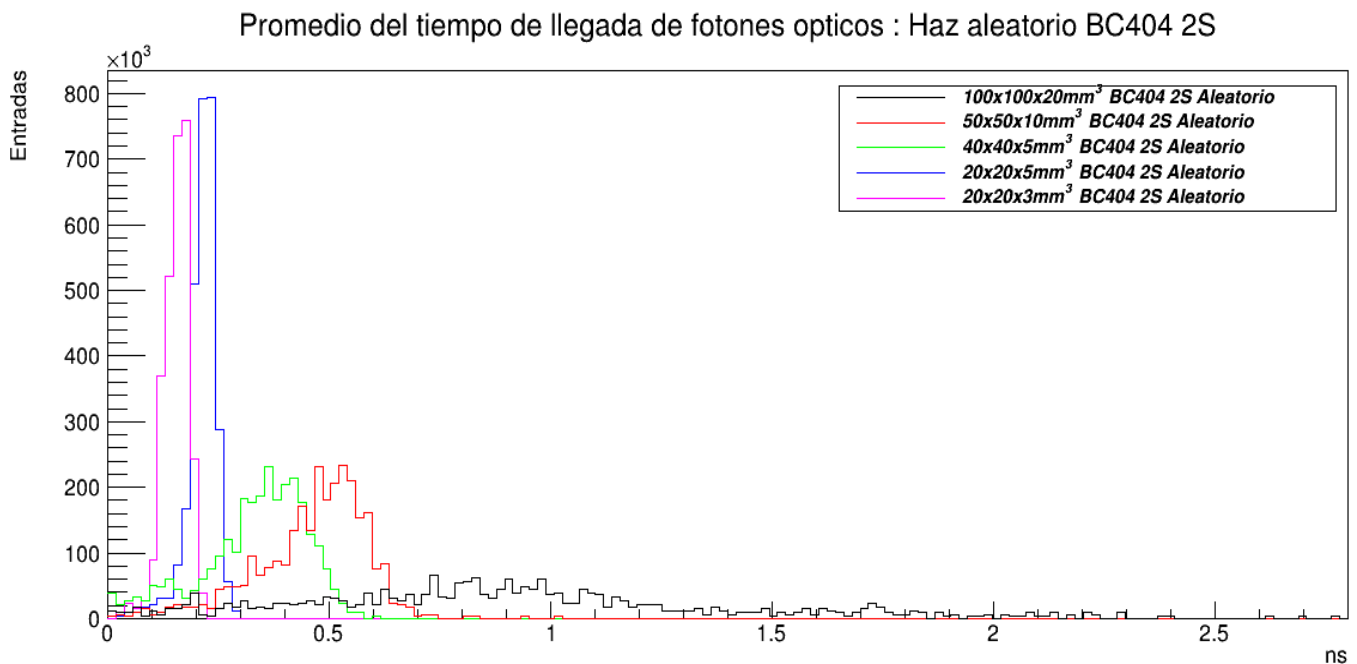


Figura 38. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-404 e interacción de haz aleatorio sobre la superficie del centellador

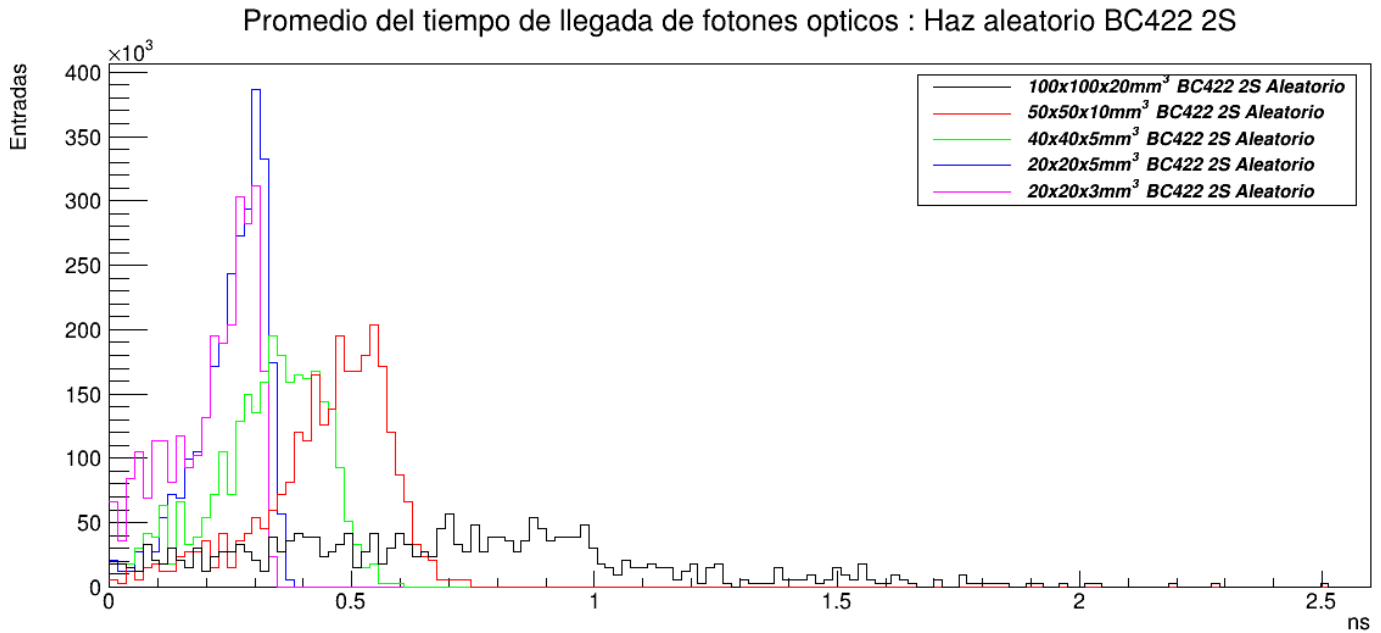


Figura 39. Histogramas correspondientes a los tiempos de llegada de cada uno de los arreglos con 2 Scores, material BC-422 e interacción de haz aleatorio sobre la superficie del centellador.

Este comportamiento que presentan los datos de ciertos histogramas al salirse de la tendencia que sugieren las configuraciones con interacción de haz en el centro, se deben principalmente a que el camino óptico de los fotones a los scores ya no es equidistante desde la esquina izquierda del centellador, aumentando la posibilidad de que los fotones en algunos eventos pudieran experimentar desviaciones en su trayectoria contribuyendo a que los tiempos de llegada a los *Scores* se modificasen, ocasionando una agrupación distinta en los datos del histograma, disminución de altura y corrimientos de sus puntos máximos, así como el estrechamiento/ensanchamiento de la distribución de los datos sobre el eje temporal.

En las Figuras 38 y 39 se muestran los últimos diez histogramas correspondientes a las simulaciones de los arreglos con materiales BC-404, BC-422 e interacción aleatoria de haz de muones sobre una cara del centellador. En estas últimas imágenes, los histogramas que rompen la tendencia comentada en el inicio de esta discusión son los datos de los arreglos de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ para ambos materiales (en color magenta) y los arreglos de $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ (en color verde) también para ambos materiales. Dichos histogramas presentan un pico máximo con una altura menor respecto a su sucesor arreglo en dimensiones: $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ y $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ respectivamente. Esto ocasionado por la aleatoriedad del haz, el cual implica que los fotones en estas configuraciones estén posicionados a una distancia al azar de los *Scores*, modificando tanto sus tiempos de llegada como la distribución de sus datos.

Posterior a graficar los histogramas de los treinta arreglos de detectores y ajustar sus histogramas a las distribuciones de probabilidad correspondientes, se prosiguió a extraer el μ y σ de cada una de ellas. Los valores de dichos parámetros se vaciaron en dos tipos de tablas, una de RT y otra de TOF, con sus respectivos errores numéricos. La tablas de RT

están conformadas de tres columnas, en la primera columna se muestran las dimensiones de los arreglos en mm^3 , en la segunda y tercer columna los datos de RT del centellador BC-404 y del centellador BC-422 en ps., respectivamente. Por su parte las tablas del promedio de los tiempos de llegada están estructuradas similarmente, bajo la diferencia que la segunda y la tercera columna muestra los datos de TOF en ps. de los fotones ópticos.

A continuación, se muestran de forma representativa las Tablas 3 y 4, las cuales contienen los valores de RT obtenidas de los ajustes de los histogramas correspondientes a las simulaciones con interacción de haz aleatorio y en la esquina inferior izquierda del centellador. En los **Apéndices A y B** se pueden visualizar las tablas asociadas a los valores de RT y TOF de todos los detectores simulados en este trabajo.

Tabla 3. Resolución temporal “BC-404 & BC-422, 2 scores”, haz de muones distribuido aleatoriamente sobre el centellador.

Arreglos (mm^3)	BC-404: Resolución Temporal (ps.)	BC-422: Resolución Temporal (ps.)
100x100x20	394.72 ± 11.41	431.33 ± 12.50
50x50x10	71.50 ± 2.74	70.61 ± 2.76
40x40x5	67.09 ± 2.58	58.83 ± 3.26
20x20x5	20.17 ± 0.48	25.35 ± 0.48
20x20x3	20.00 ± 0.62	14.80 ± 1.13

Tabla 4. Resolución temporal “BC-404 & BC-422, 2 scores”, haz de muones dirigido a la esquina inferior izquierda del centellador.

Arreglos (mm^3)	BC-404: Resolución Temporal (ps.)	BC-422: Resolución Temporal (ps.)
100x100x20	222.72 ± 8.06	286.75 ± 12.20
50x50x10	60.76 ± 1.40[58]	74.27 ± 1.19
40x40x5	54.70 ± 2.80	67.67 ± 1.09
20x20x5	16.92 ± 0.28	11.28 ± 0.20
20x20x3	14.68 ± 0.25	7.64 ± 0.43

Con los valores extraídos de los parámetros μ y σ , fue posible realizar diversos gráficos para su consecuente análisis. Las Figuras 40 y 41 son gráficas en escala logarítmica que muestran el desempeño de los materiales BC-404 y BC-422, comparando sus valores correspondientes de RT y TOF en función de las dimensiones de los centelladores.

Resolucion Temporal BC404 & BC422

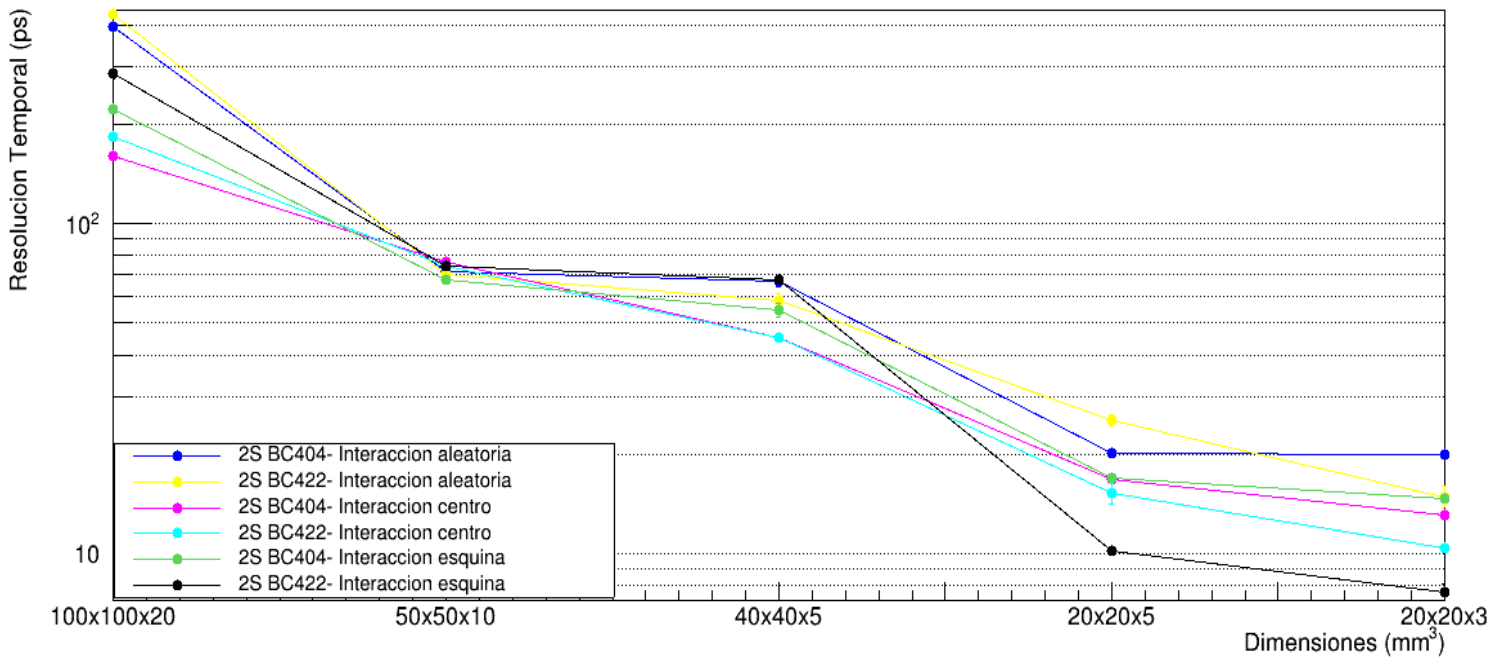


Figura 40. Resolución Temporal (RT) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 Scores, centelladores BC-404 & BC-422 y 3 interacciones debida al haz de muones: Interacción aleatoria, centrada y en la esquina del centellador. Las configuraciones de los arreglos se identifican a través de las acotaciones con distintos colores mostrados en el recuadro dentro de la gráfica.

Promedio de tiempos de llegada BC404 & BC422

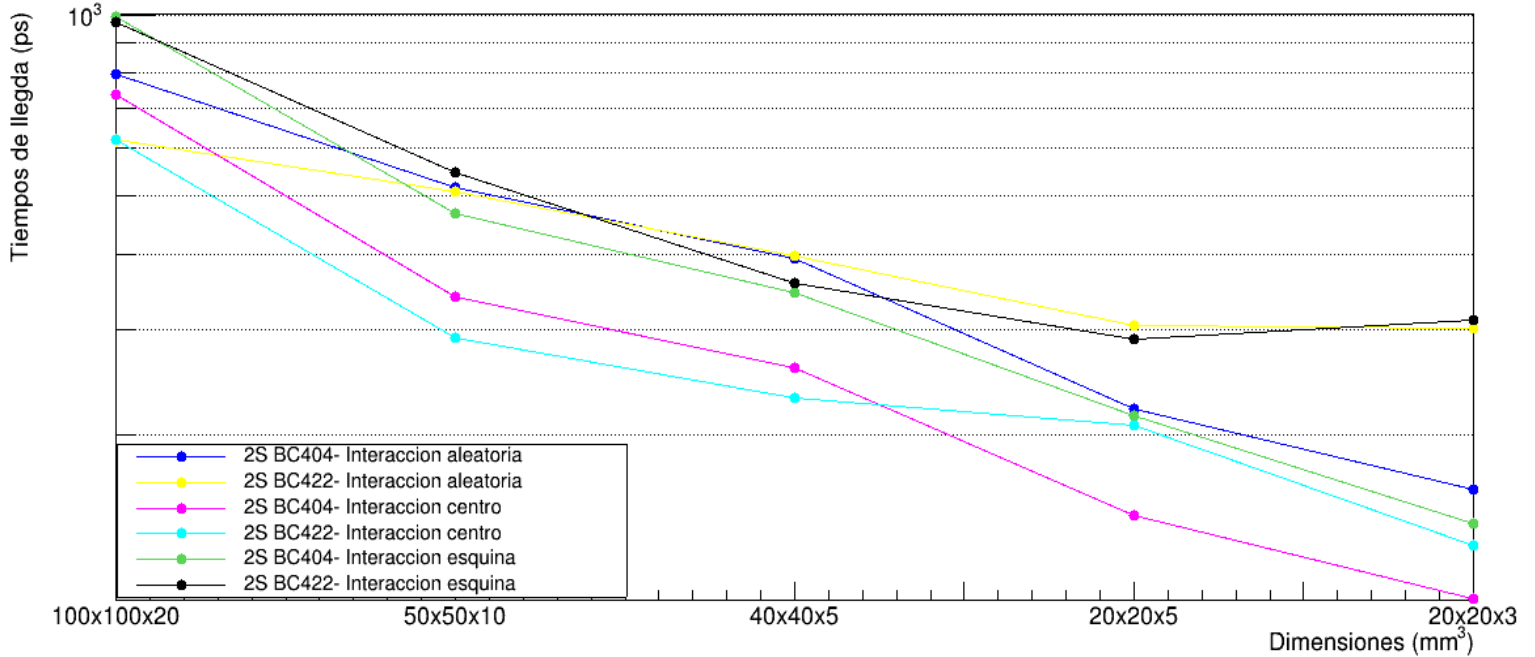


Figura 41. Promedio de tiempos de llegada (TOF) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 Scores, centelladores BC-404 & BC-422 y 3 interacciones debida al haz: Interacción aleatoria, centrada y en la esquina del centellador. Las configuraciones de los arreglos se identifican a través de las acotaciones con distintos colores mostrados en el recuadro dentro de la gráfica.

En la Figura 40, se puede observar claramente que los arreglos de detectores con peor desempeño en cuanto a RT se refiere (valor más grande) son ambos centelladores, BC-404 y BC-422, con dimensiones de $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ e interacción de haz aleatoria (colores azul marino y amarillo). Mientras que los arreglos reportados con mayor RT (valor más pequeño) son el arreglo con un volumen de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, material BC-422 e interacción de haz en el centro (color cian) con un valor de $\sigma = 10.40 \pm 0.36 \text{ ps.}$; y el arreglo de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, material BC-422 e interacción de haz en la esquina inferior izquierda (color negro) teniendo el valor más pequeños registrado en este estudio (mayor RT) de $\sigma = 7.64 \pm 0.43 \text{ ps.}$ Complementariamente la Figura 41, muestra que los peores valores de TOF (valores más grandes) corresponden a los arreglos de detectores con dimensiones más grandes ($100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$), con interacción de haz en la esquina y ambos materiales BC-404 (color verde) y BC-422 (color negro). Y los arreglos de detectores con los valores de TOF más pequeños (mejor desempeño), corresponden al arreglo de color cian ($20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, material BC-422 e interacción de haz en el centro) con un valor de $\mu = 130.71 \pm 0.13 \text{ ps.}$ y al arreglo del color magenta ($20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, material BC-404 e interacción de haz en el centro) con un valor de $\mu = 106.71 \pm 0.43 \text{ ps.}$ Es importante recalcar que los dos mejores valores de RT reportados, fueron para las dimensiones más pequeñas de material BC-422, uno con una configuración de haz centrada (cian) y otro para una configuración de haz esquinada (negro), mientras que los mejores valores de TOF reportados, corresponden a las dimensiones más pequeñas ($20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$) de un centellador BC-422 (cian) y de un centellador BC-404 (magenta), ambos configurados con una interacción de haz en el centro. Para poder observar una relación más clara entre el desempeño de los arreglos de detectores y la relación que guardan entre sí RT y TOF, se muestran en las figuras 42, 43 y 44, unas gráficas donde el eje de las ordenadas es el TOF medido en ps. y el eje las abscisas corresponde a los valores de RT de los arreglos de detectores, también medido en ps. configurados con interacción central, esquinada y aleatoria, respectivamente.

Promedio de tiempos de llegada vs Resolución Temporal : Haz centrado BC404 y BC422

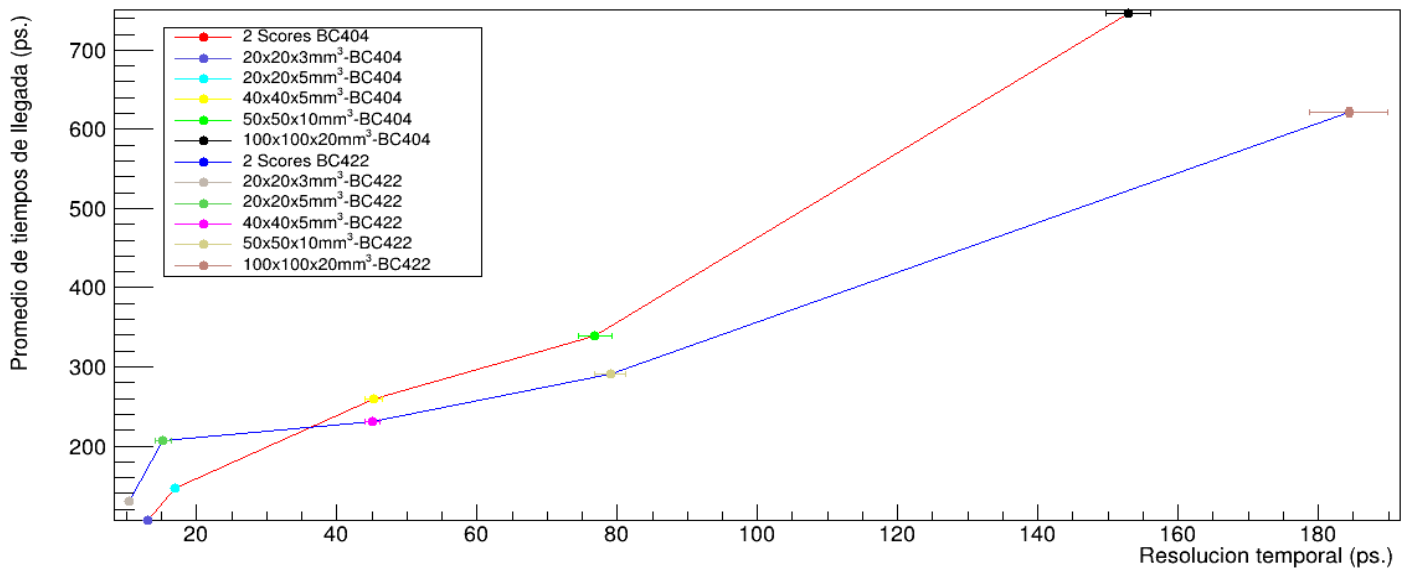


Figura 42. Promedio de tiempos de llegada (TOF) vs Resolución Temporal (RT) para los detectores correspondientes a 2 SiPM, centelladores BC-404 & BC-422 con interacción de haz al centro del centellador. Los arreglos pueden identificarse mediante los colores de las acotaciones del recuadro.

Promedio de tiempos de llegada vs Resolucion Temporal : Haz esquinado BC404 y BC422

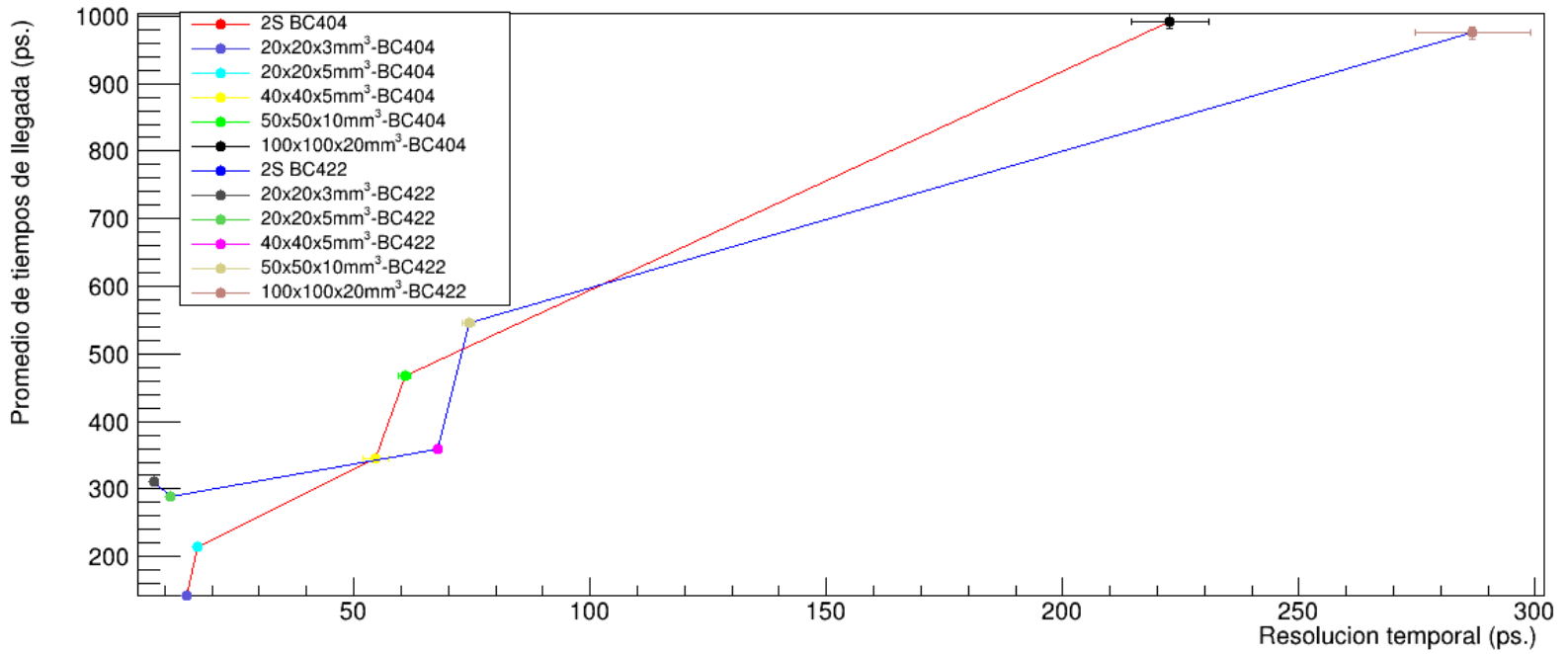


Figura 43. Promedio de tiempos de llegada (TOF) vs Resolución Temporal (RT) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 SiPM, centelladores BC-404 & BC-422 con haz de muones dirigido a la esquina izquierda del centellador.

Promedio de tiempos de llegada vs Resolucion Temporal : Haz aleatorio BC404 y BC422

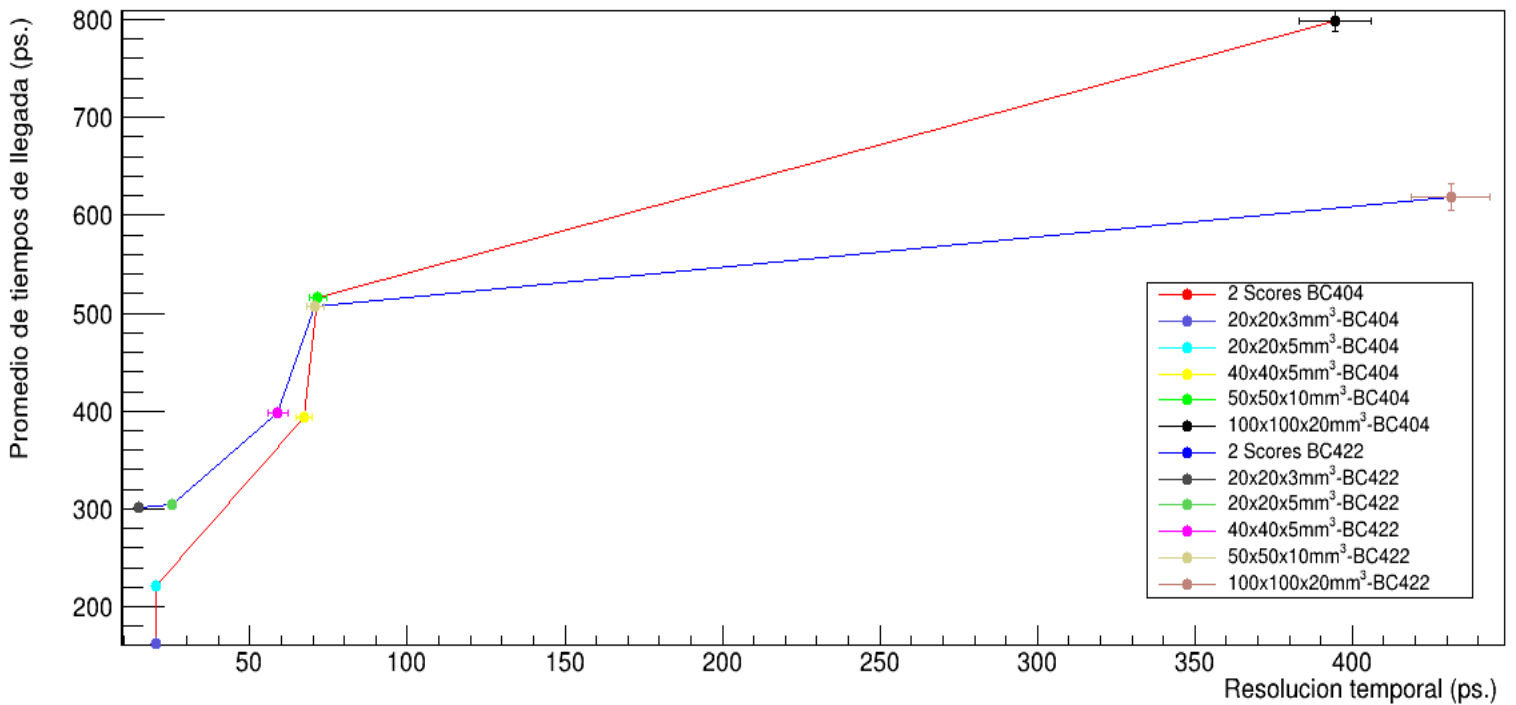


Figura 44. Promedio de tiempos de llegada (TOF) vs Resolución Temporal (RT) para cada uno de los detectores correspondientes a 2 SiPM, centelladores BC-404 & BC-422 con haz de muones distribuido aleatoriamente sobre el centellador.

Los arreglos de detectores correspondientes a los materiales BC-404 y BC-422 en las Figuras 42,43 y 44 se pueden identificar unidos a través de una línea de color rojo y color azul, respectivamente. Para los arreglos configurados con una interacción de haz central, se muestra una gráfica en la Figura 42, que muestra sus respectivos valores numéricos asociados a TOF vs RT. En ella es posible observar la tendencia sugerida anteriormente, para los centelladores con los volúmenes más grandes se tiene una baja RT y grandes valores de TOF, y a menores dimensiones se goza de mayor RT y de valores de TOF más pequeños; es justo en los arreglos con dimensiones de $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ donde se lleva a cabo el cruzamiento entre tendencias de ambos materiales, posicionando al material BC-422 con una mayor RT (valores más pequeños) pero con valores de TOF más grandes que el centellador BC-404.

La Figura 43 corresponde a una gráfica que muestra los valores de TOF vs RT reportados por los arreglos de detectores configurados con una interacción de haz en la esquina inferior izquierda del centellador, se pueden apreciar dos “*crossover*” o entrecruzamientos de las curvas de los materiales para los arreglos de $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ y $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$, donde el material BC-404 con dichas dimensiones (verde brillante y amarillo) llega a poseer valores de TOF y RT por debajo del material BC-422 con dimensiones de $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ (beige y magenta). Para el arreglo con un volumen de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ y material BC-404 (púrpura) los valores de RT son ligeramente mayores (menor resolución) a los del arreglo de $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ y material BC-422 (verde), sin embargo este último arreglo posee un valor de TOF con un peor desempeño (valor mayor) en comparación al de BC-404 (púrpura). Lamentablemente para el material BC-422 de menor volumen (gris) puede que tenga la mejor RT del gráfico, sin embargo, el valor del TOF registrada por el detector es mayor que el arreglo de $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ (verde).

Finalmente, en la gráfica asociada a la Figura 44 se muestran valores de TOF vs RT para los arreglos configurados con una interacción de haz aleatoria. Nuevamente como en la Figura 43, se aprecia un entrecruzamiento para los materiales BC-404 y BC-422 en los arreglos de dimensiones de $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ (verde brillante y beige) y también es observado como el material BC-422 va aumentando su desempeño en cuanto a RT confiere, a medida que disminuyen las dimensiones del centellador. Además el centellador con un volumen de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ y material BC-422 (verde) tiene un valor de RT más pequeño que el del material BC-404 con las mismas dimensiones (púrpura), sin embargo el material BC-422 va sacrificando desempeño del parámetro TOF para incrementar su RT.

Pensando en un experimento real, los muones chocarían aleatoriamente sobre el centellador, es por ello que en las Figuras 45 y 46, se muestran el cociente de los valores de RT y TOF (Tabla 3 y Tabla B.1) configurados con el haz aleatorio de aquí simulados.

Proporcion de RT entre BC404 & BC422

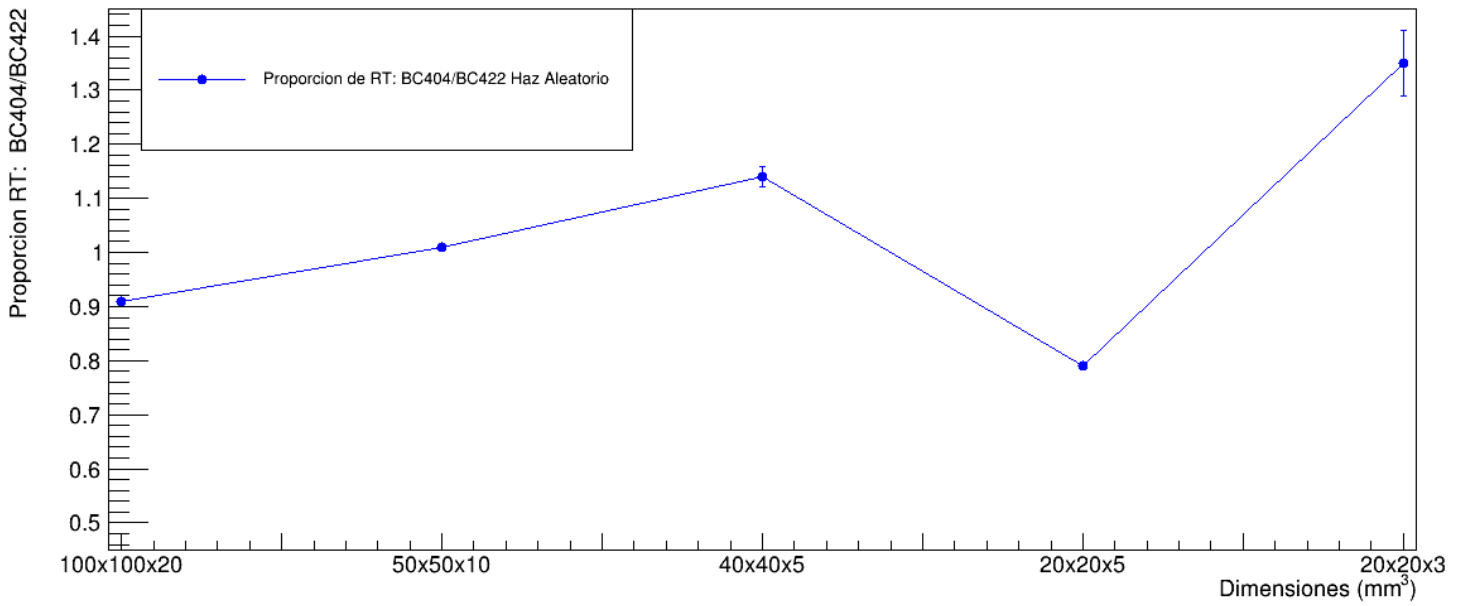


Figura 45. Cociente entre los valores de RT del material BC-404 sobre BC-422 con sus respectivos errores. Valores de haz aleatorio de muones.

Proporcion de TOF entre BC404 & BC422

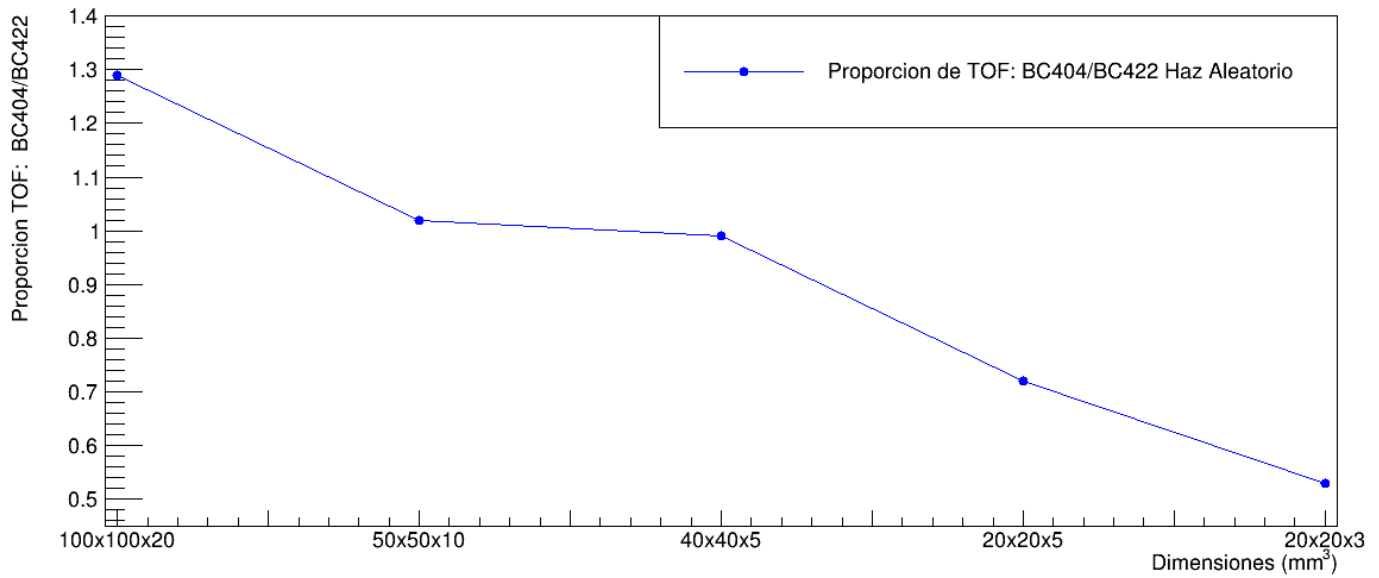


Figura 46. Cociente entre los valores de TOF del material BC-404 sobre BC-422 con sus respectivos errores. Valores de haz aleatorio de muones

Capítulo 4

4. Discusión y conclusiones

Después de haber realizado estas treinta simulaciones de arreglos de centelladores plásticos (BC-404 y BC-422) acoplados a 2 Scores en GEANT4 y haber analizado estadísticamente en ROOT los datos obtenidos es posible concluir lo siguiente:

Esta descompensación que manifiesta el material BC-422 a medida que decrece el valor de la RT y aumentan los valores de TOF de los fotones, como se observa en las Figuras 43 y 44 (en comparación a BC-404), sugieren que BC-422 es un material que no es capaz de conservar con tendencia los parámetros TOF y RT a medida que las dimensiones del centellador disminuyen, optando entonces en seleccionar con preferencia al material centellador BC-404 sobre del BC-422. Categorizando al material BC-404 como un centellador rápido, con alta RT in y alta estabilidad en cuanto a la conservación de sus valores de TOF y RT a medida que las dimensiones volumétricas del centellador decrecen.

Si se optará por manufacturar un arreglo de detectores con un acoplamiento de centellador-SiPM para la medición de radiación y detección de muones, lo más adecuado de acuerdo a este estudio sería emplear el centellador BC-404 con dimensiones de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$.

Es también prudente concluir que, la forma en la cual el haz fue configurado para interactuar con el centellador plástico, contribuye a definir la forma de la distribución estadística en la cual los datos del histograma se comportan. Esto es debido principalmente a las diferencias de camino óptico que los fotones tienen que viajar para llegar al *Score*, enfatizando el caso del haz distribuido aleatoriamente sobre la superficie del centellador, el cual es observado en este estudio.

En la Figura 45 se muestra una gráfica que representa el cociente de los valores de RT con BC-404 como numerador y BC-422 como denominador, para los arreglos de todos los tamaños. Es posible observar en dicha Figura como a medida que el tamaño del centellador disminuye el valor de dicho cociente va aumentando de 0.9 a 1.1, lo cual se interpreta que la RT para el arreglo de $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ tiene un valor menor para BC-404 que para BC-422, para los siguientes arreglos de $50 \times 50 \times 10$ y de $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$, el valor del cociente de RT es aproximadamente 1 y 1.1 respectivamente, lo cual significa que los valores de RT para BC-422 son menores que BC-404. Para los valores de RT correspondientes al arreglo de $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ la tendencia se rompe, mostrando un valor de RT para BC-404 menor que el de BC-422, lo cual se puede corroborar con la información proveída en la Tabla 3. donde se muestra que los valores de RT para los arreglos de

$20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ y centelladores BC-404 y BC-422 son $20.17 \pm 0.48 \text{ ps.}$ y $25.35 \pm 0.48 \text{ ps.}$ respectivamente. Este rompimiento de tendencia de disminuir de forma proporcional los valores de RT para BC-422 tiene una diferencia de 5 ps. aproximadamente con respecto a BC-404. Esta diferencia, como se discutió en el capítulo anterior, se debe probablemente a que para este arreglo con material BC-422 la simulación presenta más desviaciones del camino óptico de los fotones hacia los Scores, ocasionando dicha diferencia de tiempo en los datos. El arreglo con material BC-422 de volumen más pequeño, $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$, posee un valor de RT más pequeño (mejor resolución) que el de BC-404. Sin embargo, la Figura 46, muestra como el material BC-404 posee un TOF cada vez menor en comparación al material BC-422 para todos los tamaños, confirmando que el plástico centellador BC-404 tiene un mejor desempeño al no sacrificar TOF a medida que su RT mejora (valores cada vez más pequeños). En este estudio los arreglos de detectores de **BC-404 + Score** registraron **diferentes rangos de resolución temporal intrínseca**. Para el tamaño de $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ registró un rango de RT de **152.94 – 394.72 ps.**, el tamaño de $50 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ un rango de **60.76 - 76.82 ps.**, el de $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ un rango de **45.23 -67.09 ps.**, $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ con rango de **16.92 – 20.17 ps.** y el centellador con volumen más pequeño de $20 \times 20 \times 3 \text{ mm}^3$ registró un rango de **13.04 – 20.00 ps.**; **estos rangos fueron reportados tomando en cuenta una interacción aleatoria de haz de muones, una interacción central y en la esquina inferior izquierda del centellador.**

Bibliografía:

- [1] Alvarado, M., Ayala, A., Ayala-Torres, M., Bietenholz, W., Dominguez, I., Fontaine, M., González-Zamora, P., Montaña, L., Moreno-Barbosa, E., Salazar, M., Moreno, L., Nieto-Marín, P., Reyna Ortiz, V., Rodríguez-Cahuantzi, M., Tejeda-Muñoz, G., Tejeda-Yeomans, M., Villatoro-Tello, A. and Zepeda Fernández, C., 2020. A beam-beam monitoring detector for the MPD experiment at NICA. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 953, p.163150.
- [2] MASIAS, J., DELGADO, F., COLL, L., PÉREZ, A., BAZO, J. AND GAGO, A. Using a portable muon detector for radioactive source measurements and identification. In-text: (Masias et al., 2019). Your Bibliography: Masias, J., Delgado, F., Coll, L., Pérez, A., Bazo, J. and Gago, A., 2019. Using a portable muon detector for radioactive source measurements and identification. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 944, p.162588.
- [3] Giubellino, Paolo. (2004). Perspectives of the ALICE experiment. *Brazilian Journal of Physics*, 34(1a), 166-169. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332004000200004>
- [4] Lin, Wen-Jian & Jianwei, Zhao & Sun, Baohua & He, Liu-Chun & Lin, Wei-Ping & Liu, Chuan-Ye & Tanihata, I. & Terashima, Satoru & Tian, Yi & Wang, Feng & Wang, Meng & Zhang, Guangxin & Zhang, x.h & Zhu, Li-Hua & Duan, Li-Min & Hu, Rong-Jiang & Liu, Zhong & Lu, Chen-Gui & Ren, Pei-Pei & Zheng, Yong. (2016). Plastic scintillation detectors for precision Time-of-Flight measurements of relativistic heavy ions. *Chinese Physics C*. 41. 10.1088/1674-1137/41/6/066001.
- [5] W. Krzemien et al., "A novel TOF-PET detector based on plastic scintillators," 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), San Diego, CA, 2015, pp. 1-2.
- [6] Jianwei, Zhao & Sun, Baohua & Tanihata, I. & Terashima, Shojiro & Zhu, Lin & Enomoto, A. & Nagae, D. & Nishimura, T. & Omika, S. & Ozawa, A. & Takeuchi, Y. & Yamaguchi, T.. (2016). Reaching time resolution of less than 10 ps with plastic scintillation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*. 823. 41-46. 10.1016/j.nima.2016.03.106.
- [7] Zepeda, C. (2020). Time Resolution Simulation Measurement for the Configuration Plastic Scintillator Material+SiPM and its Application to Medical Physics. *Journal of Physics: Conference Series*. 1540. 012031. 10.1088/1742-6596/1540/1/012031.
- [8] Averyanov, A., Bajajin, A., Chepurnov, V., Chernenko, S., Cheremukhina, G., Fateev, O., ... Zruev, V. (2014). *Time-Projection Chamber for the MPD NICA project*. *Journal of Instrumentation*, 9(09), C09036–C09036. doi:10.1088/1748-0221/9/09/c09036.
- [9] Giubellino, Paolo. (2004). Perspectives of the ALICE experiment. *Brazilian Journal of Physics*, 34(1a), 166-169. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332004000200004>.
- [10] Kim, C., Yoo, H., Kim, Y., Moon, M., Kim, J., Kang, D., Lee, D., Kim, M., Cho, M., Lee, E. and Cho, G., 2016. CALCULATION OF GAMMA SPECTRA IN A PLASTIC SCINTILLATOR

FOR ENERGY CALIBRATION AND DOSE COMPUTATION. *Radiation Protection Dosimetry*, 170(1-4), pp.377-381.

[11] Wells, K., & Bradley, D. A. (2012). *A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage*. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(8), 1729–1746. doi:10.1016/j.apradiso.2012.01.011

[12] Giacomelli, M. G. (2019). Evaluation of silicon photomultipliers for multiphoton and laser scanning microscopy. *Journal of Biomedical Optics*, 24(10), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.24.10.106503>

[13] JOINT INSTITUTO OF NUCLEAR RESEARCH. (s. f.). *Nuclotron-based Ion Collider Facility*. NICA-Nuclotron-based Ion Collider Facility. Recuperado 17 de febrero de 2021, de <https://nica.jinr.ru>

[14] GE Healthcare. (s. f.). *Discovery IQ Gen 2*. Discovery IQ Gen 2. Recuperado 17 de febrero de 2021, de <https://www.gehealthcare.com/products/molecular-imaging/pet-ct/discovery-iq-gen-2>

[15] SIEMENS HEALTHINEERS. (s. f.). *AXIOM Artis zee multipurpose eco*. AXIOM Artis zee multipurpose eco. Recuperado 17 de febrero de 2021, de <https://www.siemens-healthineers.com/en-us/refurbished-systems-medical-imaging-and-therapy/ecoline-refurbished-systems/angiography-ecoline/artis-zee-multi-purpose-eco>

[16] ESCAN. (2020, 23 marzo). *FIB-SEM Soluciones para Ciencia de Materiales*. <https://www.tescan.com/es/product-portfolio/fib-sem-tescan-soluciones/fib-sem-tescan-soluciones-para-ciencia-de-materiales/>

[17] Eisberg, R. and Resnick, R., 1985. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, And Particles*. (pp. 699-747). New York: Wiley.

[18] Krane, K., 2012. Nuclear Structure and Radioactivity. *Modern Physics*. (pp. 369-406). Hoboken, NJ: Wiley.

[19] Segre, E. (1964). *Nuclei and particles: an introduction to nuclear and subnuclear physics*; 1st ed. New York, NY: Benjamin. URL <https://cds.cern.ch/record/100961>.

[20] Pierre Auger Observatory. (s. f.). *Observatorio de Rayos C3smicos Pierre Auger*. Observatorio Pierre Auger. Recuperado 17 de febrero de 2021, de <http://www.auger.org.ar/>

[21] Scandrette, N. (2016, diciembre). *Measurement of Muon Lifetime*. ueap.sfsu.edu. https://ueap.sfsu.edu/sites/default/files/assets/writing_awards/Measurement%20of%20Muon%20Lifetime.pdf

[22] Neddermeyer, S. H., & Anderson, C. D. (1937). *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*. *Physical Review*, 51(10), 884–886. doi:10.1103/physrev.51.884

[23] Serway, R., Moses, C., & Moyer, C. (2006). *Física Moderna* (Tercera Edici3n ed.). (pp. 547-590). M3xico D.F: CENGAGE learning.

[24] Brau, B., May, C., Ormond, R., & Essick, J. (2010). Determining the muon mass in an instructional laboratory. *American Journal of Physics*, 78(1), 64–70. doi:10.1119/1.3230034

- [25] Knoll, G., 2010. Scintillation Detector Principles. *Radiation Detection And Measurement*. (pp 223-274). Hoboken. NJ: Wiley.
- [26] Universidad de Guanajuato. (s. f.). La luz de la naturaleza: Fluorescencia y Fosforescencia. <https://www.ugto.mx/eugreka/contribuciones/171-la-luz-de-la-naturaleza-fluorescencia-y-fosforescencia#:~:text=La%20fluorescencia%20absorbe%20la%20energía,excitadora%20inicial%20haya%20sido%20apagada>
- [27] Departamento de Biología Aplicada - Universidad Miguel Hernández de Elche. (s. f.). *TEORÍA DE LA ABSORCIÓN MOLECULAR*. TEORÍA DE LA ABSORCIÓN MOLECULAR. Recuperado 19 de febrero de 2021, de https://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P_22CursoMateriales/Miguel_Angel_Sogorb/Wimba/Espectroscopia_03.htm#:~:text=Las%20transiciones%20vibracionales%20se%20producen,alrededor%20de%20centro%20de%20gravedad.
- [28] Universitat de Barcelona. (s. f.). *3.7.1 Fundamento de la técnica / Técnicas y operaciones avanzadas en el laboratorio químico (TALQ)*. TÉCNICAS Y OPERACIONES AVANZADAS EN EL LABORATORIO QUÍMICO (TALQ). Recuperado 19 de febrero de 2021, de <http://www.ub.edu/talq/es/node/259>
- [29] CRAUN, R. L., & SMITH, D. L. (1969). ANALYSIS OF RESPONSE DATA FOR SEVERAL ORGANIC SCINTILLATORS. *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS*, 80(NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO.), 239-244. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.2481&rep=rep1&type=pdf>
- [30] Bastidas, K. A. (2016, enero). Síntesis y Caracterización de Gel Centellador Tesis como requisito para obtener el grado de Maestría en Física. <http://fcfm.uas.edu.mx/posgradofisica/http://fcfm.uas.edu.mx/posgradofisica/uploads//2020/08/Bastidas-Bonilla-Karla-Adriana.pdf>
- [31] Moser, S. W., Harder, W. F., Hurlbut, C. R., & Kusner, M. R. (1993). *Principles and practice of plastic scintillator design*. *Radiation Physics and Chemistry*, 41(1-2), 31–36. doi:10.1016/0969-806x(93)90039-w
- [32] Liceo AGB. (s. f.). ESTRUCTURA MOLECULAR TEORÍA DEL ORBITAL MOLECULAR. [liceoagb.es](https://www.liceoagb.es/quimiorg/covalente3.html). Recuperado 27 de febrero de 2021, de <https://www.liceoagb.es/quimiorg/covalente3.html>
- [33] Bolívar, G. (2020, 15 junio). Epóxido: nomenclatura, obtención, aplicaciones, ejemplos. Liferder. <https://www.liferder.com/epoxido/>
- [34] ELJEN TECHNOLOGY. (2016). Plastic Scintillators - Eljen Technology. Plastic Scintillators-Eljen Technology. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators>
- [35] Zorn, C. (1990). *Studies in the radiation resistance of plastic scintillators: review and prospects*. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 37(2), 504–512. doi:10.1109/23.106669
- [36] Saint-Gobain Crystals (n.d.). BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416 Premium Plastic Scintillators. Saint-Gobain Crystals | Innovative Materials and Applications solutions. <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf>

- [37] Saint-Gobain Crystals (n.d.). BC-418, BC-420, BC-422 Premium Plastic Scintillators. Saint-Gobain Crystals | Innovative Materials and Applications solutions. <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc418-420-422-data-sheet.pdf>
- [38] Saraf, S. K., Brient, C. E., Egun, P. M., Grimes, S. M., Mishra, V., & Pedroni, R. S. (1988). *Determination of the light response of BC-404 plastic scintillator for protons and deuterons with energies between 1 and 11 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 268(1), 200–203. doi:10.1016/0168-9002(88)90606-7
- [39] Siciliano, E. R., Ely, J. H., Kouzes, R. T., Milbrath, B. D., Schweppe, J. E., & Stromswold, D. C. (2005). *Comparison of PVT and NaI(Tl) scintillators for vehicle portal monitor applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 550(3), 647–674. doi:10.1016/j.nima.2005.05.056
- [40] D. C. Stromswold, E. R. Siciliano, J. E. Schweppe, J. H. Ely, B. D. Milbrath, R. T. Kouzes, B. D. Geelhood, IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. 2003, 2, 1065 – 1069
- [41] Bertrand, G. H. V., Hamel, M., & Sguerra, F. (2014). *Current Status on Plastic Scintillators Modifications. Chemistry - A European Journal*, 20(48), 15660–15685. doi:10.1002/chem.201404093
- [42] Saint-Gobain Crystals. (2021). Organic Scintillation Materials and Assemblies. organics-plastic-scintillator. <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/organics-plastic-scintillators.pdf>
- [43] Saraf, S. K., Brient, C. E., Egun, P. M., Grimes, S. M., Mishra, V., & Pedroni, R. S. (1988). *Determination of the light response of BC-404 plastic scintillator for protons and deuterons with energies between 1 and 11 MeV. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 268(1), 200–203. doi:10.1016/0168-9002(88)90606-7
- [44] Mukhopadhyay, S. (2003, 1 junio). Plastic Gamma Sensors: An Application in Detection of Radioisotopes. OSTI.GOV. <https://www.osti.gov/biblio/811396>
- [45] DÍAZ, K. A., & CARRASCO, C. Y. (2017, junio). “ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE DETECTOR DE RADIACIÓN BASADOS EN CENTELLADORES PLÁSTICOS”. <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/6914/1/86T00041.PDF>
- [46] Ladrón de Guevara., P. (2013, febrero). Principios de los detectores de partículas [Diapositivas]. Universidad Complutense de Madrid. http://teorica.fis.ucm.es/ft11/PARTICULAS.DIR/Detectores_2.pdf
- [47] CRESPO, J. I. Estudio de la emisión de luz en los tubos fotomultiplicadores del experimento Double Chooz [en línea] (tesis). (Maestría) Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Madrid. 2011. pp.13-18. [consulta: 13 Octubre 2016]. Disponible en:

http://nuclear.fis.ucm.es/fisica_nuclear/TRABAJOS%20DEFENDIDOS/JUNIO2011/BATFM_JCr_esp0_PMT.pdf

[48] Fleta Corral, M. C. (2006, julio). Tecnología de detectores de partículas de silicio resistentes a la radiación. https://core.ac.uk/download/pdf/13322959.pdf?fbclid=IwAR3wTeWI--uuwBtvxSMx_HD6Wrg_E6wxaiX22LfmO9r9EgZibM6n_MA5GK4

[49] HyperPhysics. (2000). Doped Semiconductors. Doped Semiconductors. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/dope.html>

[50] Saveliev, V. (2010). Silicon Photomultiplier - New Era of Photon Detection. *Advances in Optical and Photonic Devices*. doi:10.5772/7150

[51] Oda, Y., H., A., Bertou, X., & Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo. (2016, mayo). Sistemas de detección de partículas basados en fotomultiplicadores con matriz de Silicio, con aplicaciones a muonografías de volcanes. <https://labdpr.cab.cnea.gov.ar/student/exp4-oda.pdf>

[52] Giacomelli, M. G. (2019). Evaluation of silicon photomultipliers for multiphoton and laser scanning microscopy. *Journal of Biomedical Optics*, 24(10), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jbo.24.10.106503>

[53] Zepeda, C. (2020). Time Resolution Simulation Measurement for the Configuration Plastic Scintillator Material+SiPM and its Application to Medical Physics. *Journal of Physics: Conference Series*. 1540. 012031. 10.1088/1742-6596/1540/1/012031.

[54] HAMAMATSU. (2016). MPPC(R) Multi-Pixel Photon Counter. MPPC for precision measurement. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf

[55] Ayala Torres, M. A., Montaña Zetina, L. M., & Sánchez, M. F. (2019). Time resolution analysis of detectors based on plastic scintillators coupled to silicon photomultipliers. *Proceedings of 7th Annual Conference on Large Hadron Collider Physics — PoS(LHCP2019)*, 0-20. <https://doi.org/10.22323/1.350.0062>

[56] Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de la Plata. (2021). Cámara Gamma: Resolución 1 [Diapositivas]. <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/medicinanuclear/>. <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/medicinanuclear/Clase%202.pdf>

[57] Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., ... Barrand, G. (2016). *Recent developments in Geant 4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 835, 186–225. doi:10.1016/j.nima.2016.06.125

[58] Cern-GEANT4. (2021, 5 febrero). Overview | geant4.web.cern.ch. Overview|. <https://geant4.web.cern.ch/node/1>

[59] OpenDose. (s. f.). OpenDose. OpenDose: Monte Carlo simulations. Recuperado 21 de marzo de 2021, de <https://www.opendose.org/simus>

[60] Cosmo, G. C. (2020, 4 diciembre). *examples/extended/optical/OpNovice/README · master geant4 / geant4*. GitLab. <https://gitlab.cern.ch/geant4/geant4/blob/master/examples/extended/optical/OpNovice/README>

APÉNDICE A:

TABLAS DE RESULTADOS DE RESOLUCIÓN TEMPORAL (RT), 2 SCORES Y MATERIALES BC-404 & BC-422

Tabla A.1. RESOLUCIÓN TEMPORAL “BC-404 & BC-422, 2 SCORES”, HAZ DE MUONES DISTRIBUIDO ALEATORIAMENTE SOBRE EL CENTELLADOR

Arreglos (mm ³)	BC-404: Resolución Temporal (ps.)	BC-422: Resolución Temporal (ps.)
100x100x20	394.72 ± 11.41	431.33 ± 12.50
50x50x10	71.50 ± 2.74	70.61 ± 2.76
40x40x5	67.09 ± 2.58	58.83 ± 3.26
20x20x5	20.17 ± 0.48	25.35 ± 0.48
20x20x3	20.00 ± 0.62	14.80 ± 1.13

Tabla A.2. RESOLUCIÓN TEMPORAL “BC-404 & BC-422, 2 SCORES”, HAZ DE MUONES DIRIGIDO AL CENTRO DEL CENTELLADOR

Arreglos (mm ³)	BC-404: Resolución Temporal (ps.)	BC-422: Resolución Temporal (ps.)
100x100x20	152.94 ± 3.17	184.33 ± 5.54
50x50x10	76.82 ± 2.36	78.98 ± 2.26
40x40x5	45.23 ± 1.22	45.06 ± 1.09
20x20x5	16.94 ± 0.43	15.20 ± 1.12
20x20x3	13.04 ± 0.38	10.40 ± 0.36

Tabla A.3. RESOLUCIÓN TEMPORAL “BC-404 & BC-422, 2 SCORES”, HAZ DE MUONES DIRIGIDO A LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA DEL CENTELLADOR

Arreglos (mm ³)	BC-404: Resolución Temporal (ps.)	BC-422: Resolución Temporal (ps.)
100x100x20	222.72 ± 8.06	286.75 ± 12.20
50x50x10	60.76 ± 1.40	74.27 ± 1.19
40x40x5	54.70 ± 2.80	67.67 ± 1.09
20x20x5	16.92 ± 0.28	11.28 ± 0.20
20x20x3	14.68 ± 0.25	7.64 ± 0.43

APÉNDICE B:

PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA(TOF), 2 SCORES Y MATERIALES BC-404 & BC-422

Tabla B.1. PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA DE LOS FOTONES "BC-404 & BC-422, 2 SCORES ", HAZ DE MUONES DISTRIBUIDO ALEATORIAMENTE SOBRE EL CENTELLADOR

Arreglos (mm ³)	BC-404: Promedio de tiempos de llegada(ps.)	BC-422: Promedio de tiempos de llegada(ps.)
100x100x20	798.13 ± 10.91	618.95 ± 13.55
50x50x10	516.65 ± 3.81	507.47 ± 3.52
40x40x5	393.80 ± 4.25	397.91 ± 5.62
20x20x5	221.06 ± 0.56	305.06 ± 1.41
20x20x3	161.95 ± 1.02	301.49 ± 2.14

Tabla B.2. PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA DE LOS FOTONES "BC-404 & BC-422, 2 SCORES ", HAZ DE MUONES DIRIGIDO AL CENTRO DEL CENTELLADOR

Arreglos (mm ³)	BC-404: Promedio de tiempos de llegada(ps.)	BC-422: Promedio de tiempos de llegada(ps.)
100x100x20	745.67 ± 5.10	621.51 ± 6.21
50x50x10	339.55 ± 2.85	290.45 ± 2.54
40x40x5	258.87 ± 1.50	230.95 ± 1.48
20x20x5	147.05 ± 0.56	207.26 ± 1.73
20x20x3	106.71 ± 0.43	130.71 ± 0.13

Tabla B.3. PROMEDIO DE TIEMPOS DE LLEGADA DE LOS FOTONES "BC-404 & BC-422, 2 SCORES ", HAZ DE MUONES DIRIGIDO A LA ESQUINA INFERIOR IZQUIERDA DEL CENTELLADOR

Arreglos (mm ³)	BC-404: Promedio de tiempos de llegada(ps.)	BC-422: Promedio de tiempos de llegada(ps.)
100x100x20	992.24 ± 11.30	974.90 ± 9.10
50x50x10	466.84 ± 2.25	545.74 ± 1.52
40x40x5	345.60 ± 3.55	358.45 ± 1.40
20x20x5	215.41 ± 1.74	288.84 ± 0.39
20x20x3	142.69 ± 0.25	310.4 ± 0.59

APÉNDICE C:

DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS 2 SCORES: RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF)

APÉNDICE C.1. RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF): HAZ ALEATORIO 2 SCORES BC-404

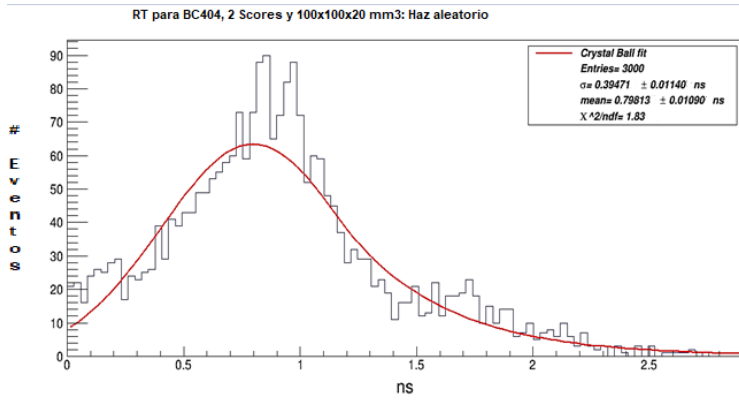


Figura C.1.A. Distribución CrystalBall: 100x100x20mm³ 2 Scores BC-404 Haz Aleatorio

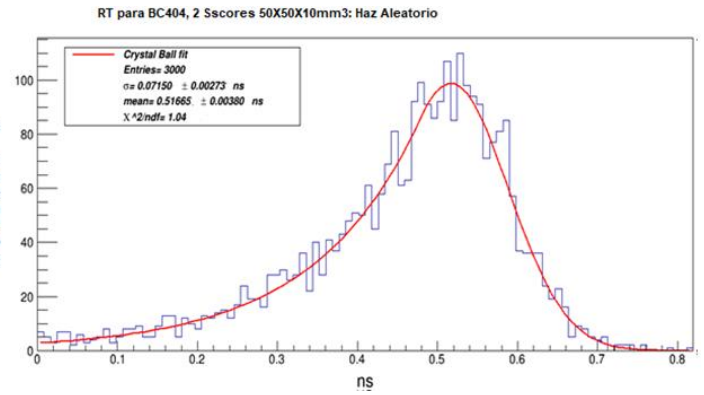


Figura C.1.B. Distribución CrystalBall: 50x50x10mm³ 2 Scores BC-404 Haz Aleatorio

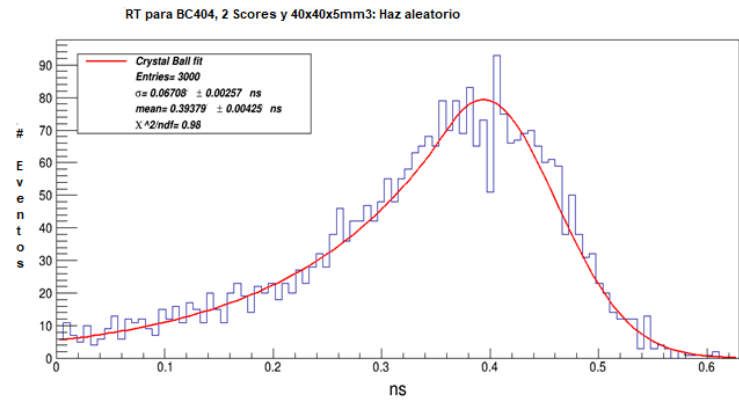


Figura C.1.C Distribución CrystalBall: 40x40x5mm³ 2 Scores BC-404 Haz Aleatorio

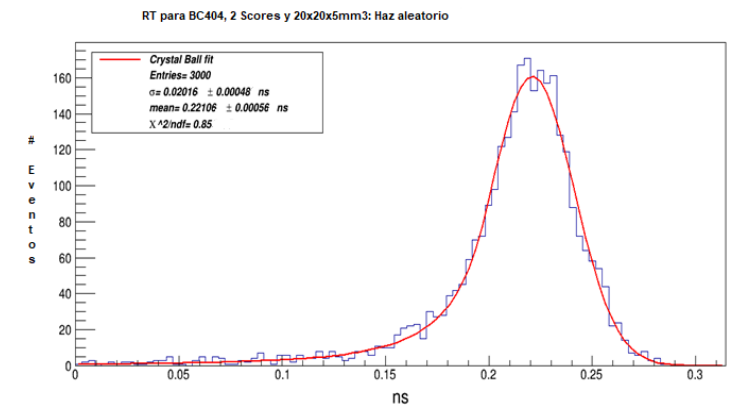


Figura C.1.D Distribución CrystalBall: 20x20x5mm³ 2 Scores BC-404 Haz Aleatorio

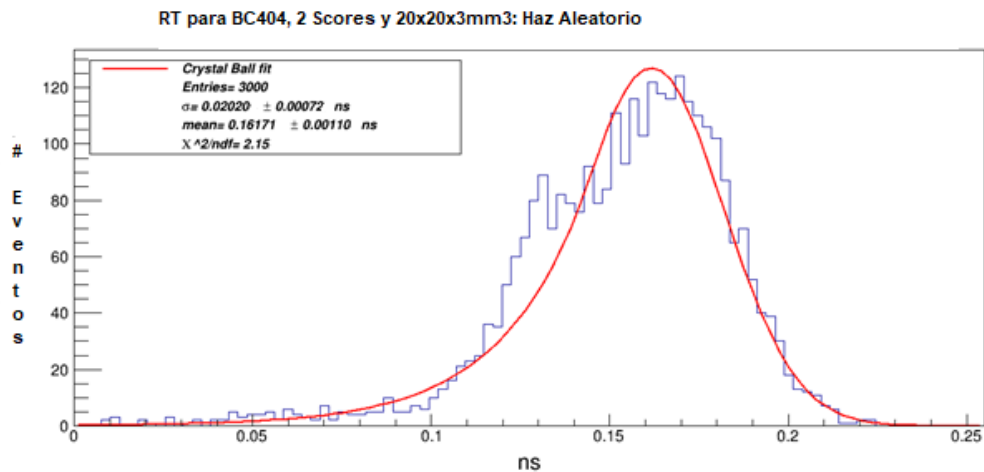
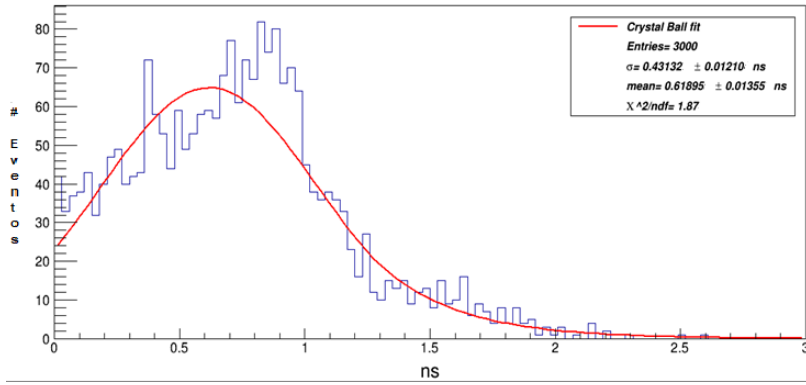


Figura C.1.E Distribución CrystalBall: 20x20x3mm³ 2 Scores BC-404 Haz Aleatorio

APÉNDICE C.2: RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF): HAZ ALEATORIO 2 SCORES BC-422

RT para BC422, 2 Scores y 100x100x20 mm³ : Haz aleatorio



RT para BC422, 2 Scores y 50x50x10 mm³ : Haz aleatorio

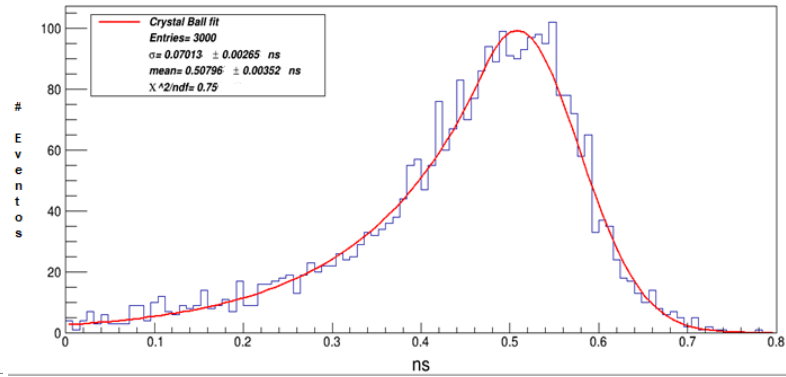
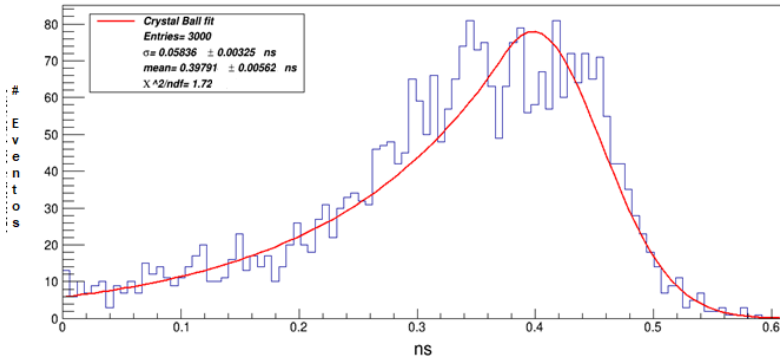


Figura C.2.1. Distribución CrystalBall: 100x100x20mm³ 2 Scores BC-422 Haz Aleatorio

Figura C.2.1. Distribución CrystalBall: 50x50x10mm³ 2 Scores BC-422 Haz Aleatorio

RT para BC422, 2 Scorer y 40x40x5 mm³ : Haz aleatorio



RT para BC422, 2 Scores y 20x20x5 mm³ : Haz aleatorio

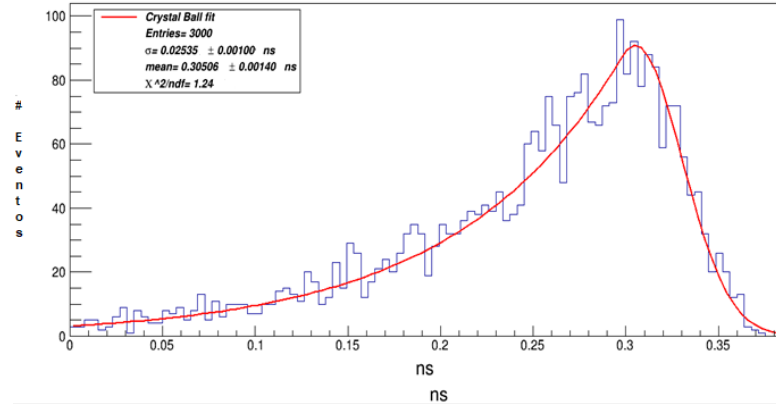


Figura C.2.3. Distribución CrystalBall: 40x40x5mm³ 2 Scores BC-422 Haz Aleatorio

Figura C.2.4. Distribución CrystalBall: 20x20x5mm³ 2 Scores BC-422 Haz Aleatorio

RT para BC422, 2 Scores y 20x20x3 mm³ : Haz aleatorio

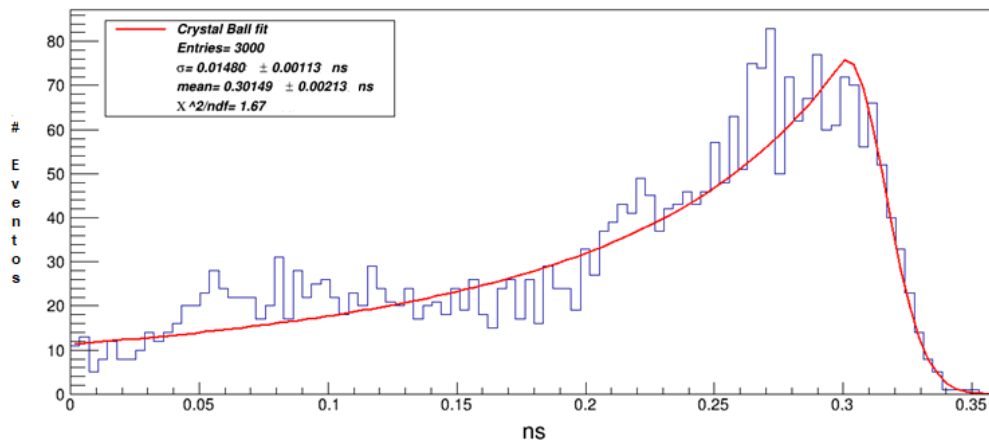


Figura C.25E. Distribución CrystalBall: 20x20x3mm³ 2 Scores BC-422 Haz Aleatorio

APÉNDICE C.3: RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF): HAZ CENTRADO 2 SCORES BC-404

RT para BC404, 2 Scores y 100x100x20 mm³: Haz centrado

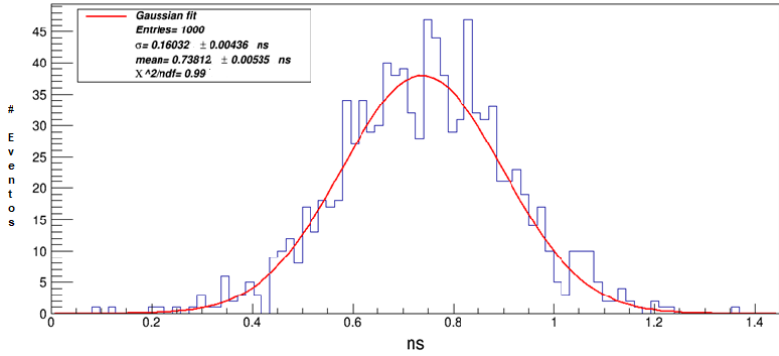


Figura C.3.A. Distribución Gaussiana: 100x100x20mm³ 2 Scores BC-404 Haz Centrado

RT para Bc404, 2 Scores y 50x50x10 mm³: Haz centrado

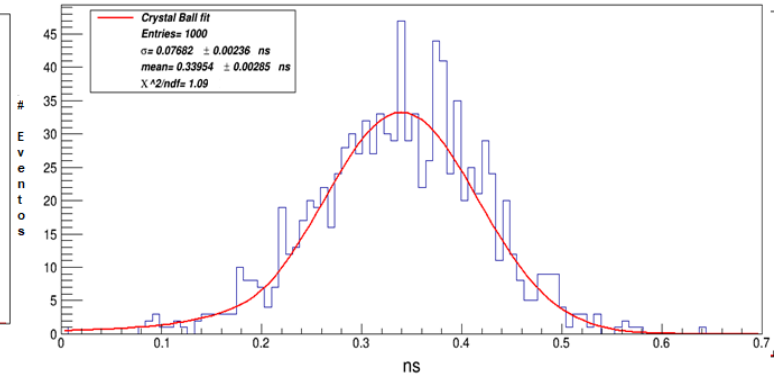


Figura C.3.B. Distribución Crystalball: 50x50x10mm³ 2 Scores BC-404 Haz Centrado

RT para BC404, 2 Scores y 40x40x5 mm³: Haz centrado

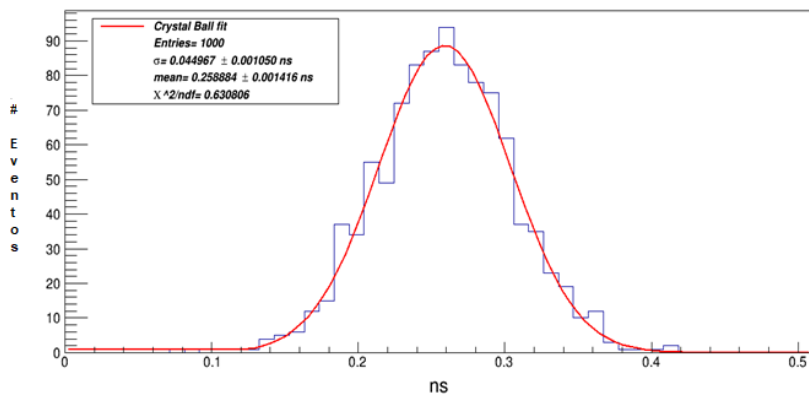


Figura C.3.C. Distribución Crystalball: 40x40x5mm³ 2 Scores BC-404 Haz Centrado

RT para BC404, 2 Scores y 20x20x5 mm³: Haz centrado

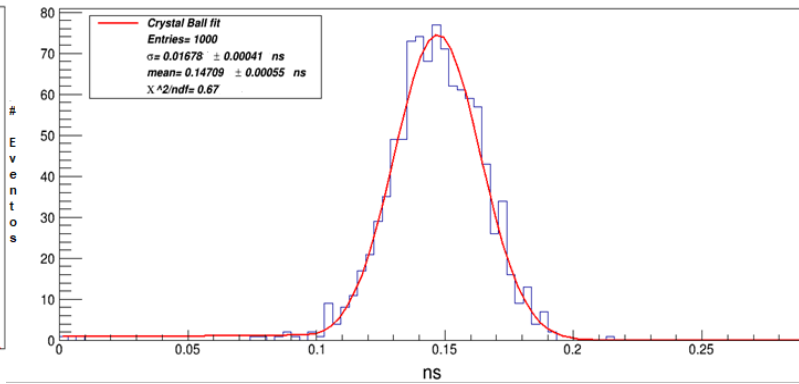


Figura C.3.D. Distribución Crystalball: 20x20x5mm³ 2 Scores BC-404 Haz Centrado

RT para BC404, 2 Scores y 20x20x3 mm³: Haz centrado

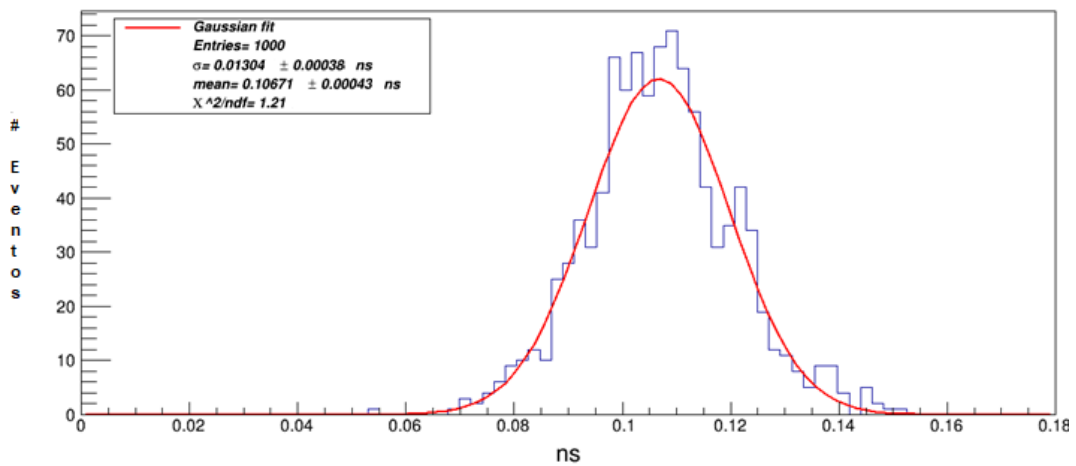


Figura C.3.D. Distribución Gaussiana: 20x20x3mm³ 2 Scores BC-404 Haz Centrado

APÉNDICE C.4: RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF): HAZ CENTRADO 2 SCORES BC-422

RT para BC422, 2 Scores y 100x100x20 mm³: Haz centrado

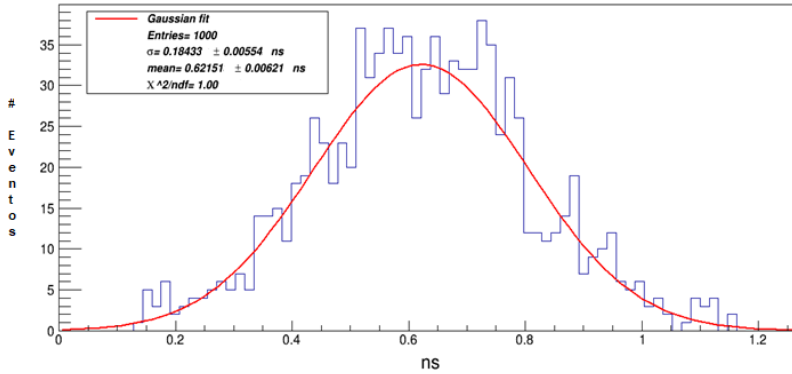


Figura C.4.A. Distribución Gaussiana: 100x100x20mm³ 2 Scores BC-422 Haz Centrado

RT para BC422, 2 Scores y 50x50x10 mm³: Haz centrado

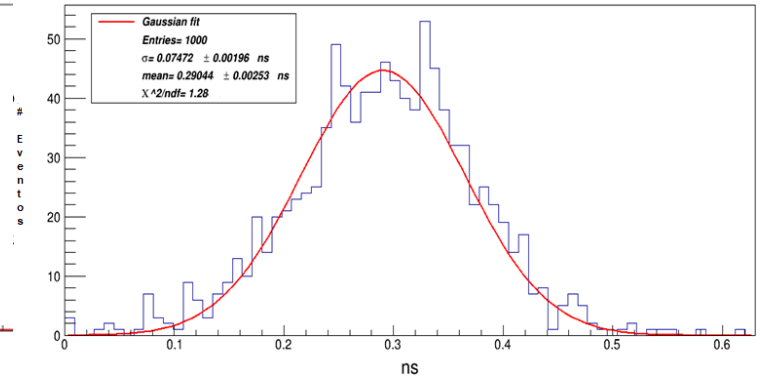


Figura C.4.B. Distribución Gaussiana: 50x50x10mm³ 2 Scores BC-422 Haz Centrado

RT para BC422, 2 Scores y 40x40x5 mm³: Haz centrado

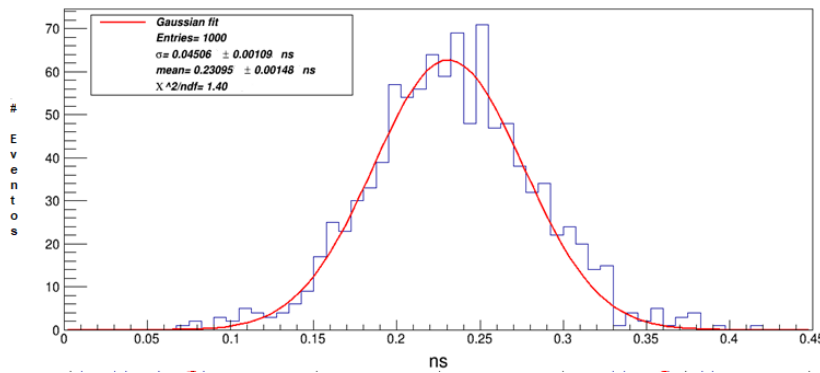


Figura C.4.C. Distribución Gaussiana: 40x40x5mm³ 2 Scores BC-422 Haz Centrado

RT para BC422, 2 Scores y 20x20x5 mm³: Haz centrado

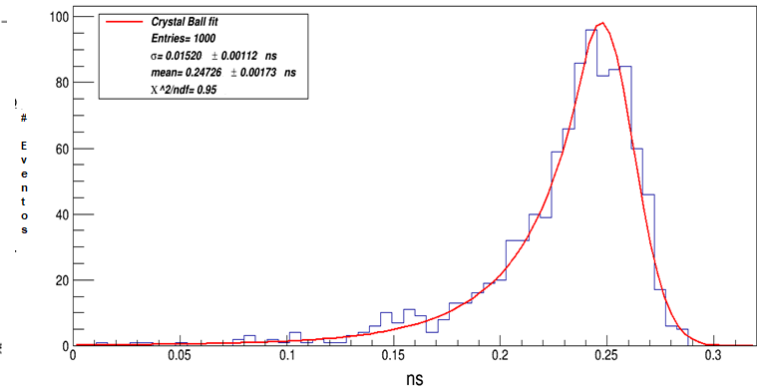


Figura C.4.D. Distribución Crystalball: 20x20x5mm³ 2 Scores BC-422 Haz Centrado

RT para BC422, 2 Scores y 20x20x3 mm³ Haz centrado

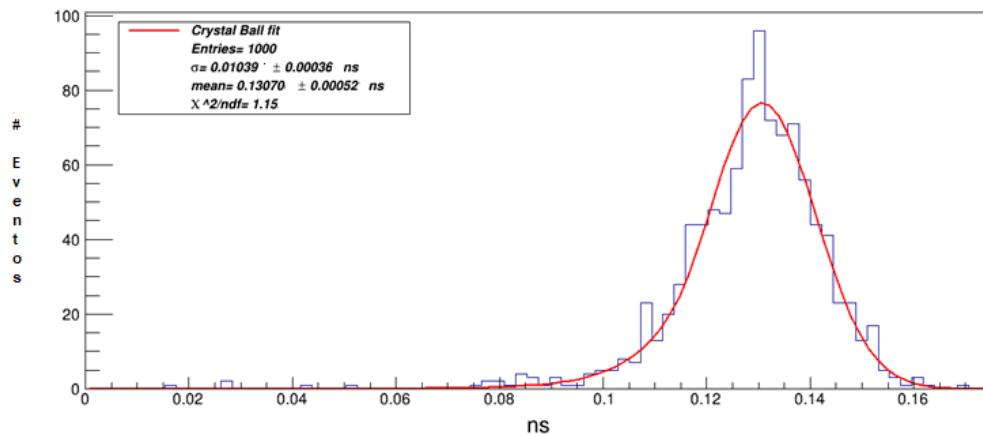
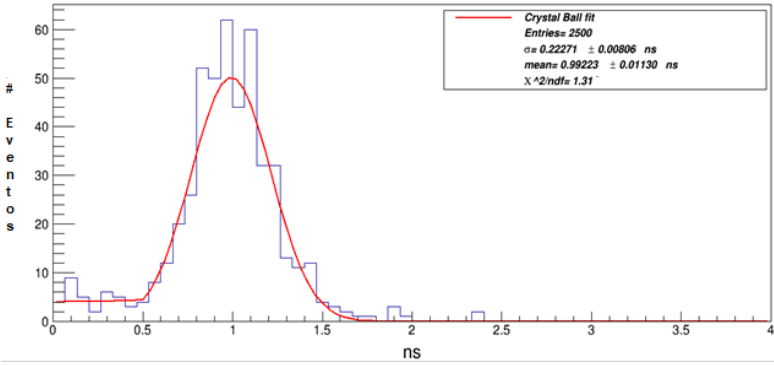


Figura C.4.E. Distribución Crystalball: 20x20x3mm³ 2 Scores BC-422 Haz Centrado

APÉNDICE C.5: RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF): HAZ ESQUINADO 2 SCORES BC-404

RT para BC422, 2 Scores y 100x100x20 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda



RT para BC404, 2 Scores y 50x50x10 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda.

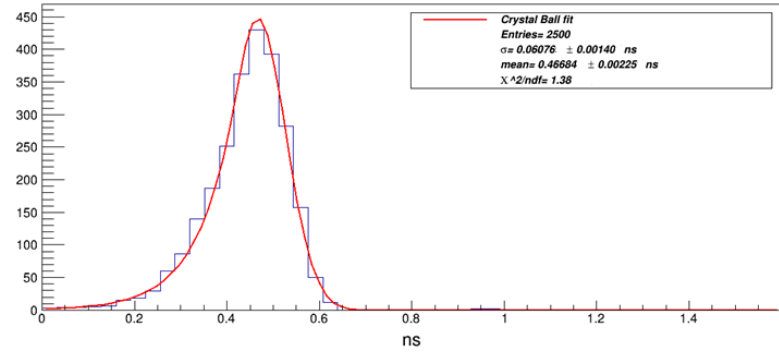
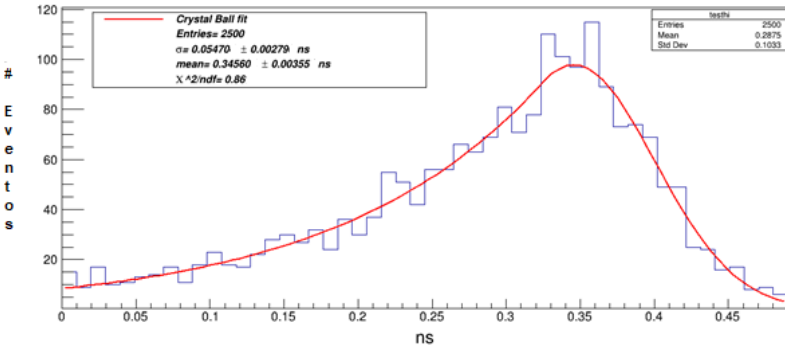


Figura C.5.A. Distribución Crystalball: 100x100x20mm³ 2 Scores BC-404 Haz Esquinado

Figura C.5.B. Distribución Crystalball: 50x50x10mm³ 2 Scores BC-404 Haz Esquinado

RT para BC404, 2 Scores y 40x40x5 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda



RT para BC404, 2 Scores 20x20x5 mm³ : haz Esquinado a la izquierda

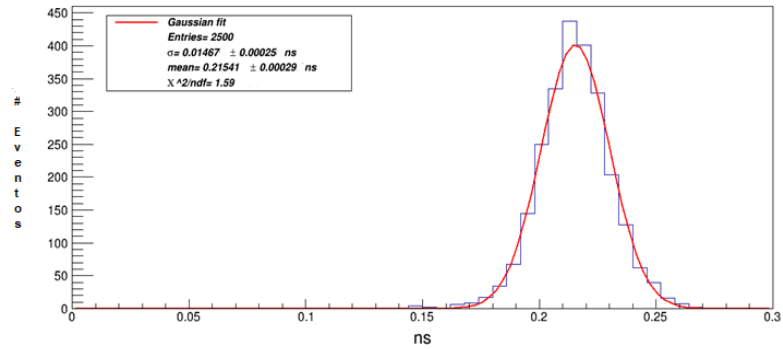


Figura C.5.C. Distribución CrystalBall: 40x40x5mm³ 2 Scores BC-404 Haz Esquinado

Figura C.5.D. Distribución Gaussiana: 20x20x5mm³ 2 Scores BC-404 Haz Esquinado

RT para BC404, 2 Scores y 20x20x5 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda

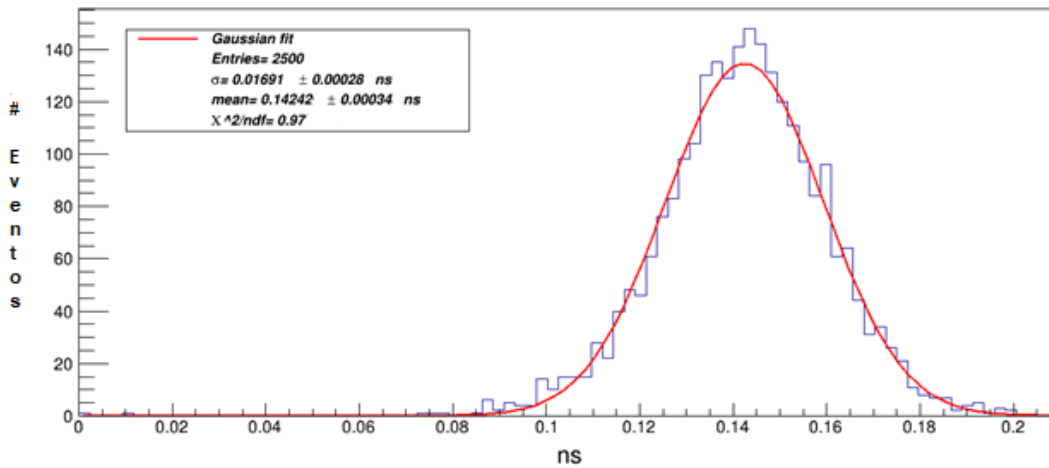


Figura C.5.E. Distribución Gaussiana: 20x20x3mm³ 2 Scores BC-404 Haz Esquinado

APÉNDICE C.6: RESOLUCIONES TEMPORALES (RT) Y TIEMPOS DE LLEGADA (TOF): HAZ ESQUINADO2 SCORES BC-422

RT para BC422, 2 Scores y 100x100x20 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda

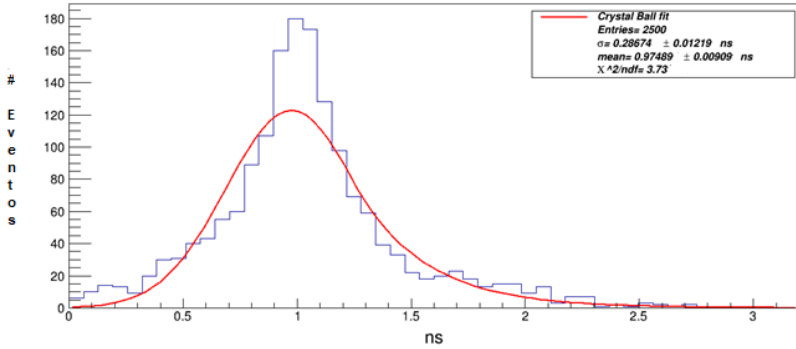


Figura C.6.A. Distribución Crystalball: 100x100x20mm³ 2 Scores BC-422 Haz Esquinado

RT para BC422, 2 Scores y 50x50x10 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda

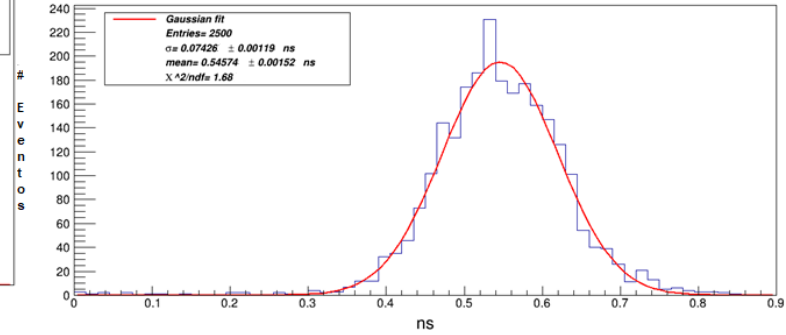


Figura C.6.B. Distribución Gaussiana: 50x50x10mm³ 2 Scores BC-422 Haz Esquinado

RT para BC422, 2 Scores y 40x40x5 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda

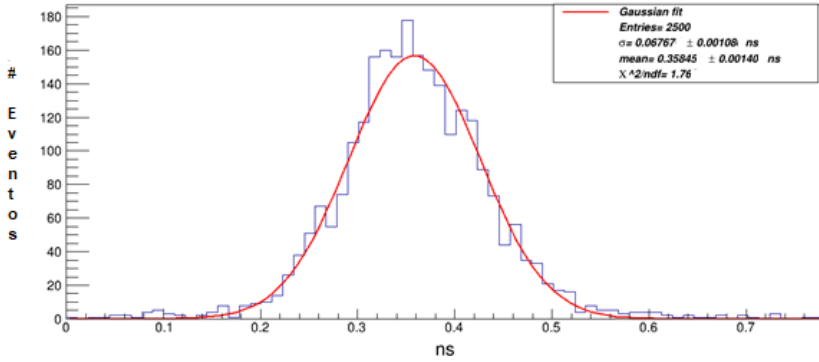


Figura C.6.C. Distribución Gaussiana: 40x40x5mm³ 2 Scores BC-422 Haz Esquinado

RT para BC422, 2 Scores ay 20x20x5 m3³ : Haz Esquinado a la izquierda

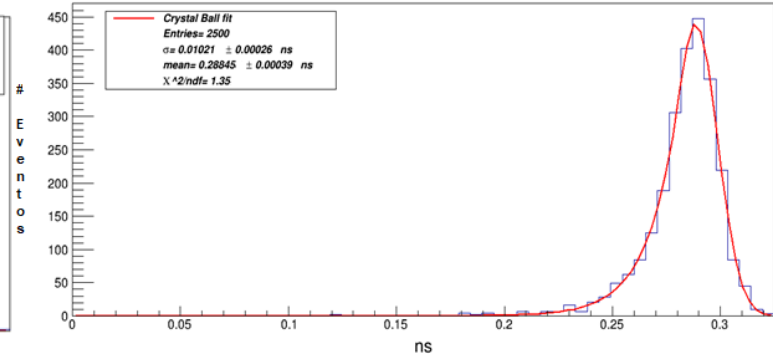


Figura C.6.D. Distribución Crystalball: 20x20x5mm³ 2 Scores BC-422 Haz Esquinado

RT para BC422, 2 Scores y 20x20x3 mm³ : Haz Esquinado a la izquierda

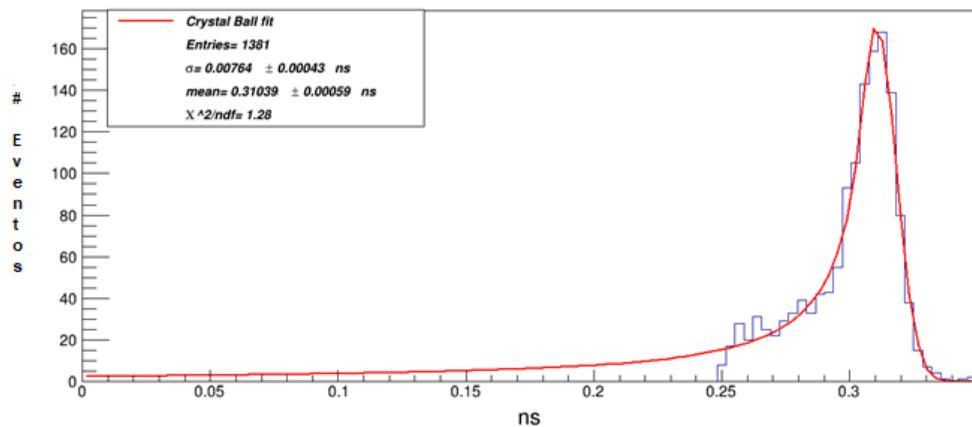


Figura C.6.E. Distribución Crystalball: 20x20x3mm³ 2 Scores BC-422 Haz Esquinado

APÉNDICE D:

CÓDIGO EN C++ DEL SCRIPT "OpNoviceDetectorConstruction.cc", COMPILADO EN GEANT4 PARA SIMULAR LA GEOMETRÍA DE LOS DETECTORES CON PLÁSTICOS CENTELLADORES (BC-404 & BC-422) ACOPLADOS A 2 SCORES.

```
#include "OpNoviceDetectorConstruction.hh"
#include "G4Material.hh"
#include "G4Element.hh"
#include "G4LogicalBorderSurface.hh"
#include "G4LogicalSkinSurface.hh"
#include "G4OpticalSurface.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"
#include "G4NistManager.hh"
//....oooOO00Oooo.....oooOO00Oooo.....oooOO00Oooo.....oooOO00Oooo.....

OpNoviceDetectorConstruction::OpNoviceDetectorConstruction() : G4VUserDetectorConstruction()
{
  fExpHall_x = fExpHall_y = fExpHall_z = 25*cm;
  fTank_x   = fTank_y   = 100.0*mm /* 50,40,20,20*/; fTank_z   = 20.0*mm /*10,5,5,3*/ ;
  fBubble_y = fBubble_z =3.0*mm; fBubble_x = 0.5*mm;
}

//....oooOO00Oooo.....oooOO00Oooo.....oooOO00Oooo.....oooOO00Oooo.....
OpNoviceDetectorConstruction::~OpNoviceDetectorConstruction(){;}

G4VPhysicalVolume* OpNoviceDetectorConstruction::Construct()
{

  /// ----- Materials -----

  G4double a, z, density;
  G4int nelements;

  // Air

  G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", z=7 , a=14.01*g/mole);
  G4Element* O = new G4Element("Oxygen" , "O", z=8 , a=16.00*g/mole);
  G4Material* air = new G4Material("Air", density=1.29*mg/cm3, nelements=2);
  air->AddElement(N, 70.*perCent);
```

```

//Quartz
a = 28.09*g/mole;
G4Element* eSi = new G4Element("Silicon", "Si", z=14., a);
G4Material* quartz = new G4Material("Quartz", density=2.200*g/cm3, nelements=2);
quartz->AddElement(eSi, 1);
quartz->AddElement(O, 2);

///_____Bc404 AND Bc422_____
// FOR BC404 //
G4double photonEnergyBc404[] =
{2.479*eV, 2.53*eV, 2.583*eV, 2.637*eV, 2.695*eV, 2.755*eV, 2.81*eV, 2.883*eV, 2.952*eV, 3.024*eV, 3.0613*eV,
3.099*eV, 3.138*eV, 3.179*eV, 3.262*eV};

// FOR BC422 //
/*
G4double photonEnergyBc404[] =
{2.701*eV , 2.818*eV , 2.883*eV , 2.952*eV , 3.077*eV , 3.10*eV , 3.179*eV , 3.246*eV ,
3.28*eV, 3.332*eV , 3.36*eV , 3.430*eV , 3.454*eV , 3.522*eV , 3.565*eV};
*/
const G4int nEntries404 = sizeof(photonEnergyBc404)/sizeof(G4double);
G4NistManager* nistManager = G4NistManager::Instance();
G4Material* Bc404 = nistManager->FindOrBuildMaterial("G4_PLASTIC_SC_VINYLTOLUENE");
G4double RINDEX_Bc404[]={1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58, 1.58};
assert(sizeof(RINDEX_Bc404) == sizeof(photonEnergyBc404));

// FOR BC404
G4double ABSORPTION_Bc404[] =
{1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m, 1.4*m};

/*
// FOR BC422 //
G4double ABSORPTION_Bc404[] =
{1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m, 1.2*m};
//
*/

assert(sizeof(ABSORPTION_Bc404) == sizeof(photonEnergyBc404));

```



```

// FOR BC404 //
G4double SCINTILLATION_Bc404[]=
{0.01 , 0.02 , 0.03 , 0.048 , 0.18 , 0.31 , 0.4 , 0.5 , 0.6 , 0.99 , 0.95 , 0.9 , 0.5 , 0.3 , 0.05};

// FOR BC422 //
/*
G4double SCINTILLATION_Bc404[]=
{ 0.02 , 0.17 , 0.28 , 0.39 , 0.6 , 0.65 , 0.8 , 0.9 ,0.99 , 0.9 , 0.8 , 0.6 , 0.4 , 0.2 , 0.02};
*/

assert(sizeof(SCINTILLATION_Bc404) == sizeof(photonEnergyBc404));

G4MaterialPropertiesTable *Bc404_mt = new G4MaterialPropertiesTable();
Bc404_mt->AddProperty("RINDEX", photonEnergyBc404, RINDEX_Bc404, nEntries404)->SetSpline(true);
Bc404_mt->AddProperty("ABSLLENGTH", photonEnergyBc404, ABSORPTION_Bc404, nEntries404)->SetSpline(true);
Bc404_mt->AddProperty("FASTCOMPONENT", photonEnergyBc404, SCINTILLATION_Bc404, nEntries404)
>SetSpline(true);

/// Geant does not take into account the rise time
Bc404_mt->AddConstProperty("SCINTILLATIONYIELD",11832.0/MeV);
Bc404_mt->AddConstProperty("RESOLUTIONSCALE",1.0);
Bc404_mt->AddConstProperty("FASTTIMECONSTANT", 1.*ns);
Bc404_mt->AddConstProperty("YIELDRATIO",1.);
Bc404->SetMaterialPropertiesTable(Bc404_mt);

/// ----- Generate & Add Material Properties Table -----
G4double photonEnergy[] =
{2.034*eV, 2.068*eV, 2.103*eV, 2.139*eV,
 2.177*eV, 2.216*eV, 2.256*eV, 2.298*eV,
 2.341*eV, 2.386*eV, 2.433*eV, 2.481*eV,
 2.532*eV, 2.585*eV, 2.640*eV, 2.697*eV,
 2.757*eV, 2.820*eV, 2.885*eV, 2.954*eV,
 3.026*eV, 3.102*eV, 3.181*eV, 3.265*eV,
 3.353*eV, 3.446*eV, 3.545*eV, 3.649*eV,
 3.760*eV, 3.877*eV, 4.002*eV, 4.136*eV };

const G4int nEntries = sizeof(photonEnergy)/sizeof(G4double);

```


///*Quartz Boundary Conditions*

```
G4OpticalSurface* opQuartzSurface = new G4OpticalSurface("QuartzSurface");
opQuartzSurface->SetType(dielectric_metal);
opQuartzSurface->SetFinish(polished);
opQuartzSurface->SetModel(glisur);
opQuartzSurface->SetSigmaAlpha(4.);
```

```
G4OpticalSurface* opScorerSurface = new G4OpticalSurface("ScorerSurface");
opScorerSurface->SetType(dielectric_metal);
opScorerSurface->SetFinish(polished);
opScorerSurface->SetModel(glisur);
opScorerSurface->SetSigmaAlpha(4.);
```

```
const G4int num = 2;
G4double ephoton[num] = { 1.0*eV, 10.0*eV };
G4double reflectivity[num] = {0.95,0.95};
G4double efficiency[num] = { 1.0,1.0 };
```

```
G4MaterialPropertiesTable* mySPT1 = new G4MaterialPropertiesTable();
mySPT1->AddProperty("REFLECTIVITY", ephoton, reflectivity, num);
mySPT1->AddProperty("EFFICIENCY", ephoton, efficiency, num);
mySPT1->DumpTable();
opQuartzSurface->SetMaterialPropertiesTable(mySPT1);
```

```
G4double reflectivitySurfScore[num]= { 0.0,0.0 };
G4MaterialPropertiesTable* mySPT2 = new G4MaterialPropertiesTable();
mySPT2->AddProperty("REFLECTIVITY", ephoton, reflectivitySurfScore, num);
mySPT2->AddProperty("EFFICIENCY", ephoton, efficiency, num);
mySPT2->DumpTable();
opScorerSurface->SetMaterialPropertiesTable(mySPT2);
new G4LogicalBorderSurface("QuartzSurface", det_phys1, expHall_phys, opQuartzSurface);
//new G4LogicalBorderSurface("QuartzSurface", det_phys2, expHall_phys, opQuartzSurface);
new G4LogicalBorderSurface("ScorerSurface", det_phys1, FinalScorer_phys_A, opScorerSurface);
new G4LogicalBorderSurface("ScorerSurface", det_phys1, FinalScorer_phys_B, opScorerSurface);
```

///*Quartz Boundary Conditions*

///*always return the physical World*

```
return expHall_phys;
}
```

///*.....oooOOOOooo.....oooOOOOooo.....oooOOOOooo.....oooOOOOooo.....*

