

Hodoscopio de Matrices Centelladoras

Juan José Guzmán Mejía*

Detector que reconstruye la trayectoria de una partícula.

Dos planos detectores formados por barras o tiras en direcciones ortogonales.

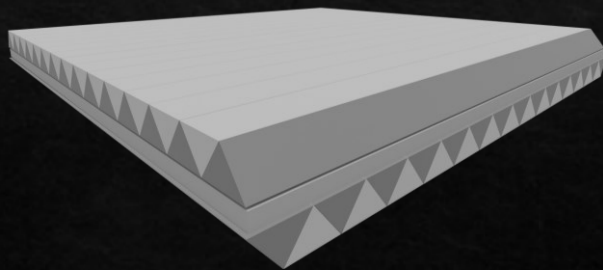
Hodoscopio de Matrices Centelladoras

Material de plástico centellador.

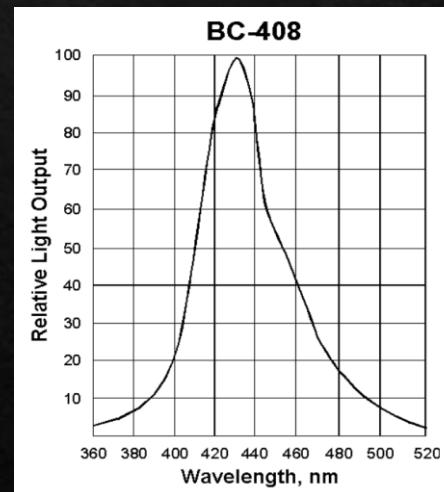
Parte Óptica

Barras Centelladoras

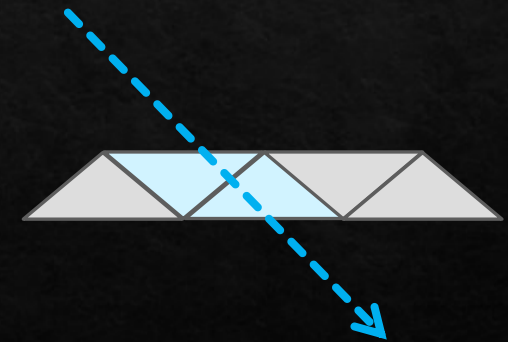
Polímeros aromáticos como **poliestireno** o **viniltolueno**, dopados con compuestos fluorescentes que actúan como emisores de luz. En el hodoscopio se usa **BC-408** dopado con **P-terfenilo (PTP)**, en forma de prismas triangulares de **4 cm** de base, **2 cm** de alto y **60 cm** de largo. Se disponen **29 barras** con orientación alternada en una dirección y **29 barras** en otra con el fin de reconstruir la posición de impacto con un área de 60cm x 60cm.



Disposición de las barras que forman cada matriz. Entre planos hay una placa de 90 mm de MDF.



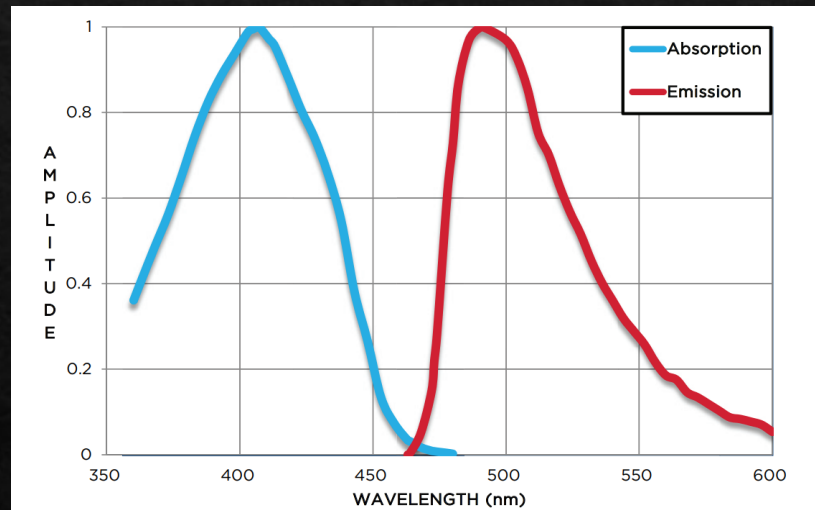
Espectro de emisión del BC-408.



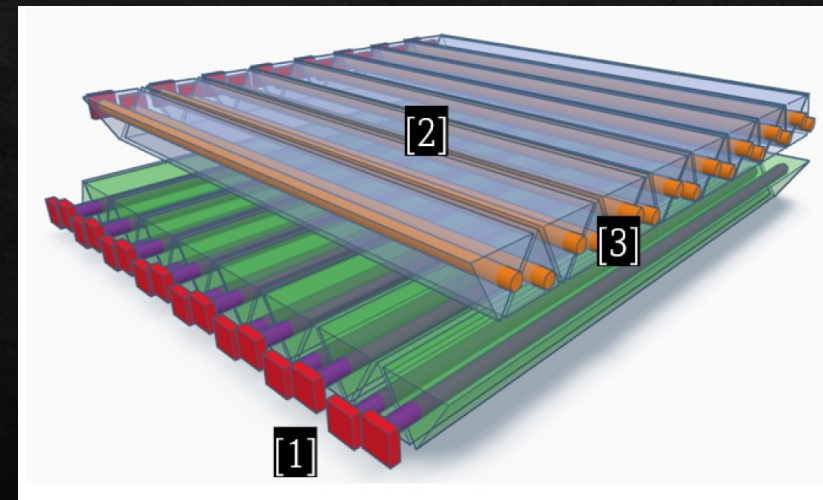
Se deberían activar siempre dos barras en cada dirección. Resolución de 4 mm con centro de carga.

Fibras WLS (*Wavelength Shifting*)

Recolectan la luz producida en el centellador, la absorben, la reemiten a una longitud de onda más favorable para su detección y la redirigen a lo largo de su longitud. En el hodoscopio se usan fibras **BCF-92**, acopladas a lo largo de las barras, para guiar la luz hasta los SiPM con menores pérdidas y mejor acoplamiento óptico.



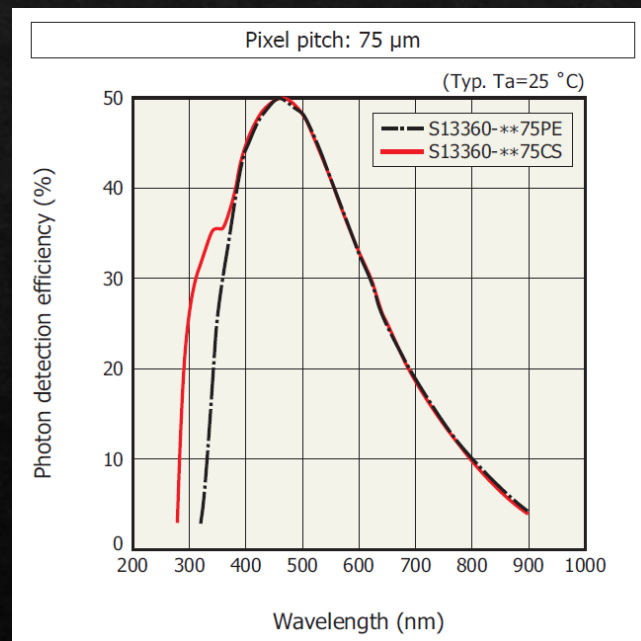
Amplitud de la absorción y emisión en función de la longitud de onda para el modelo BCF92.



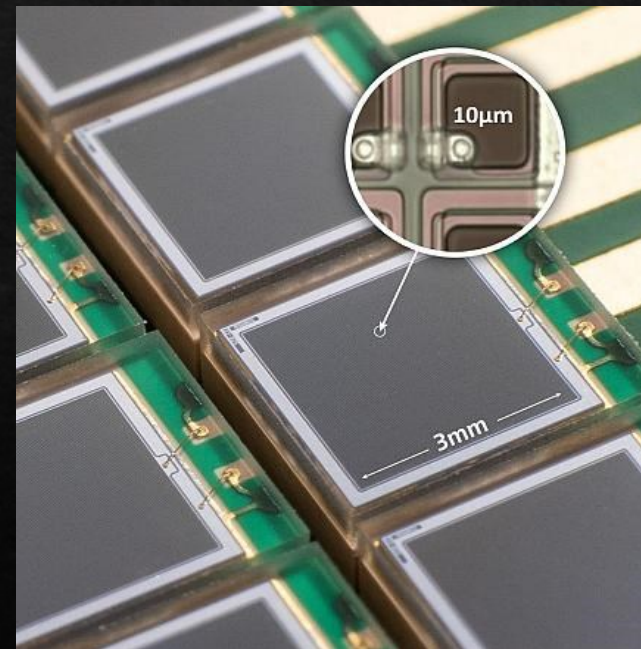
Esquema de cada matriz con los SiPM [1], las barras [2] y las fibras WLS [3]

SiPM (*Silicon Photomultiplier*)

Un **SiPM** (*Silicon Photomultiplier*) es un fotodetector semiconductor formado por una matriz de microceldas **APD** (*Avalanche Photodiode*). Cada microcelda está preparada para que un fotón pueda disparar una avalancha eléctrica; la suma de las microceldas activadas produce un pulso eléctrico proporcional a la luz recibida. En el hodoscopio se usan Hamamatsu S13360-3075PE y Hamamatsu S13360-1375PE.



Eficiencia de detección de fotones en función de la longitud de onda para un SiPM S13360-3075PE.

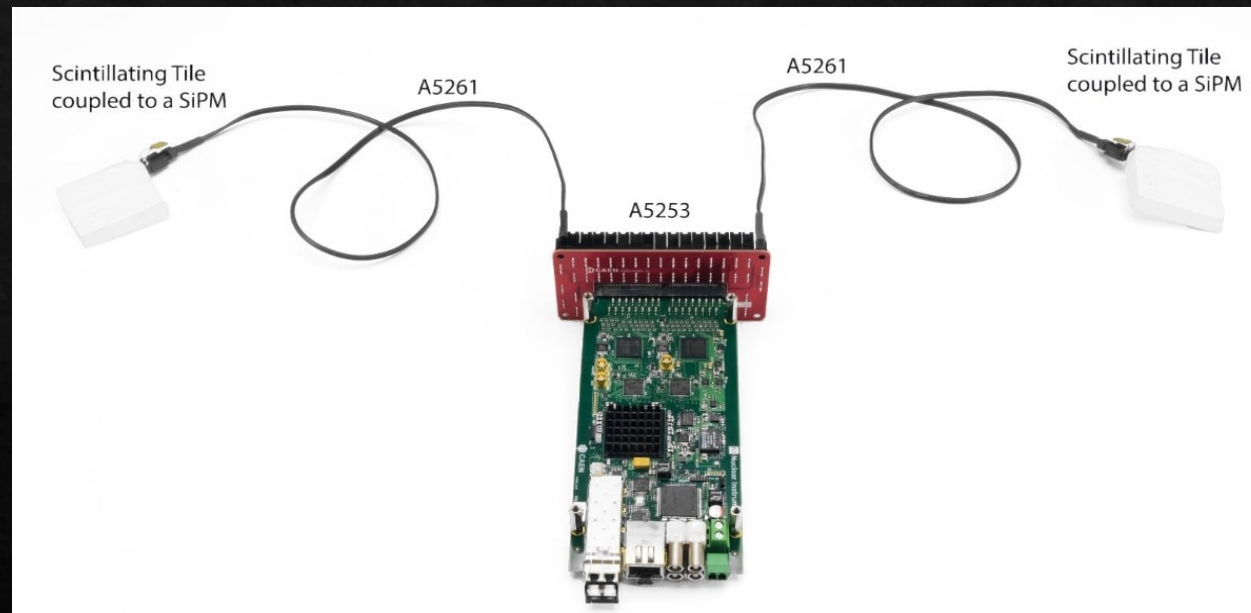


Estructura de un SiPM con su matriz de microceldas APD sobre un sustrato de silicio.

Parte Electrónica y Software

CAEN A5202

Es una tarjeta de electrónica del sistema **FERS-5200** (*Front-End Readout System*), diseñada para leer hasta **64 canales de SiPM** y suministrarles su **voltaje de operación**. Cada A5202 integra dos chips **Citiroc-1A**, que procesan las señales de los SiPM mediante **preamplificación, conformación de pulso, discriminación, medición de amplitud y digitalización**.



Tarjeta A5202 con el adaptador A5253 y los cables A5261.

CAEN A5202

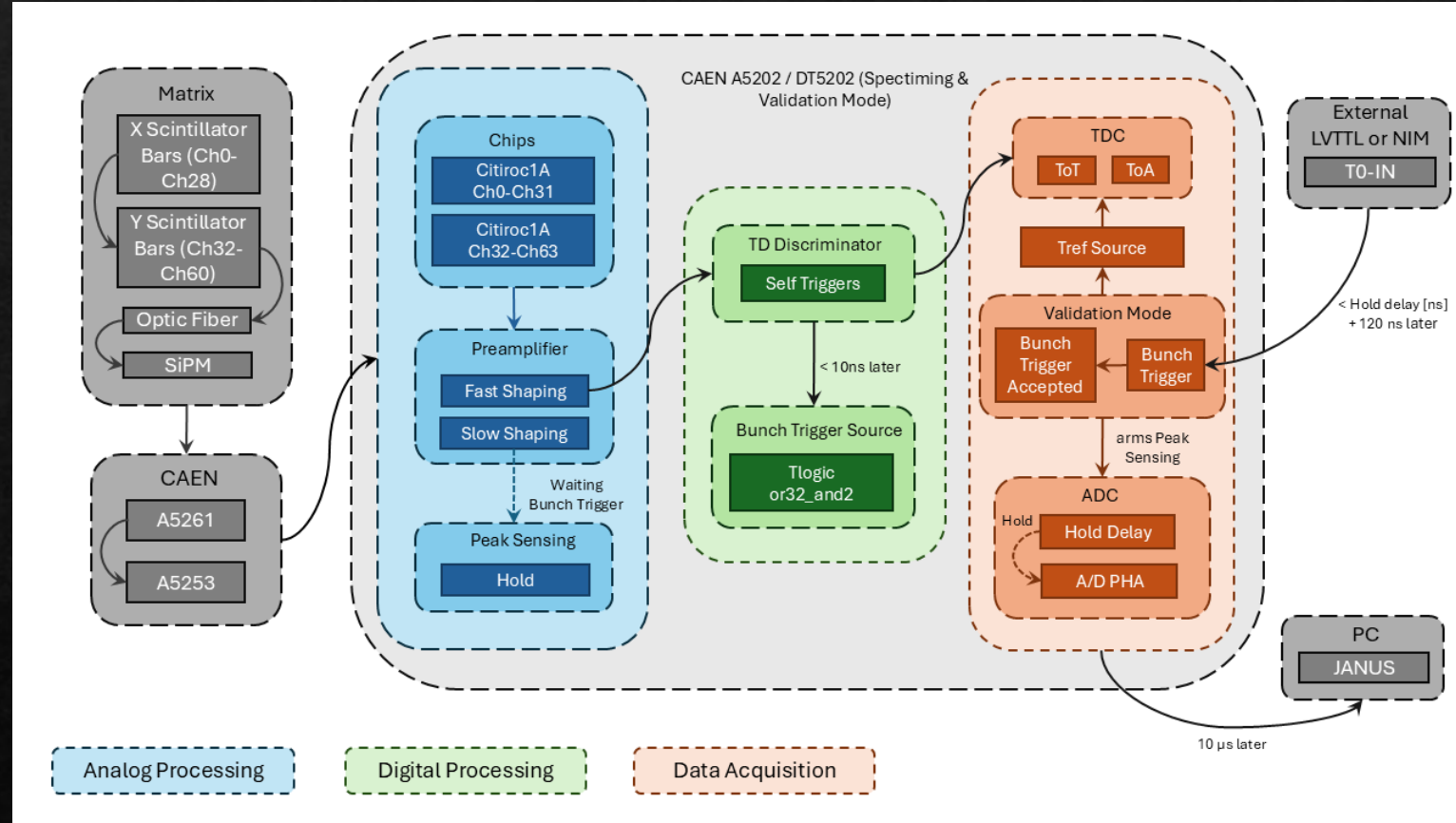


Diagrama ilustrativo de la cadena de adquisición para la CAEN A5202 en modo Spectiming y Validación con señal externa.

CAEN DT5215

Es el concentrador del sistema FERS-5200: sincroniza varias tarjetas, concentra la lectura de datos y las comunica con el computador mediante Ethernet o USB. Se conecta a las tarjetas FERS mediante enlaces ópticos TDlink, que transportan datos, control y sincronización.



Esquema de la conexión daisy chain TDlink de las tarjetas A5202 al concentrador DT5215. Las imágenes fueron tomadas de los manuales.

JANUS

JANUS es el software de control y adquisición del sistema FERS-5200. Desde allí se configuran las tarjetas, los voltajes de polarización, los umbrales, los modos de adquisición, el trigger, la validación y los archivos de salida.


Acquisition Mode	SPECTROSCOPY
Bunch Trigger Source	TLOGIC
Veto Source	DISABLED
Validation Source	T0-IN
Validation Mode	DISABLED
Counting Mode	SINGLES
Channel Trigger Width	0 ns
Trigger ID Mode	TRIGGER_CNT
Trigger Logic	OR32_AND2
TLogic Width	0 ns
Majority Level	3
Periodic Trigger Period	1 ms
T0-Out	ZERO
T1-Out	ZERO
Ch Enable Mask Chip 0	0xFFFFFFFF
Ch Enable Mask Chip 1	0xFFFFFFFF

HV VBias	55 V
HV IMax	1.0 mA
HV DAC Dynamic Range	4.5
HV DAC Individual Set	255
Temp Sensor Type	TMP37
Temp Feedback Coeff	35
Enable Temp Feedback	<input type="checkbox"/>

T-Discriminators	
Fast Shaper Input	HG-PA
TD Coarse Threshold	600
TD Fine Threshold	0
Hit_HoldOff	0
TLogic Mask Chip 0	0xFFFFFFFF
TLogic Mask Chip 1	0xFFFFFFFF

Pantallazos de algunas funciones importantes de JANUS. Los parámetros mostrados no son los que se usan actualmente.

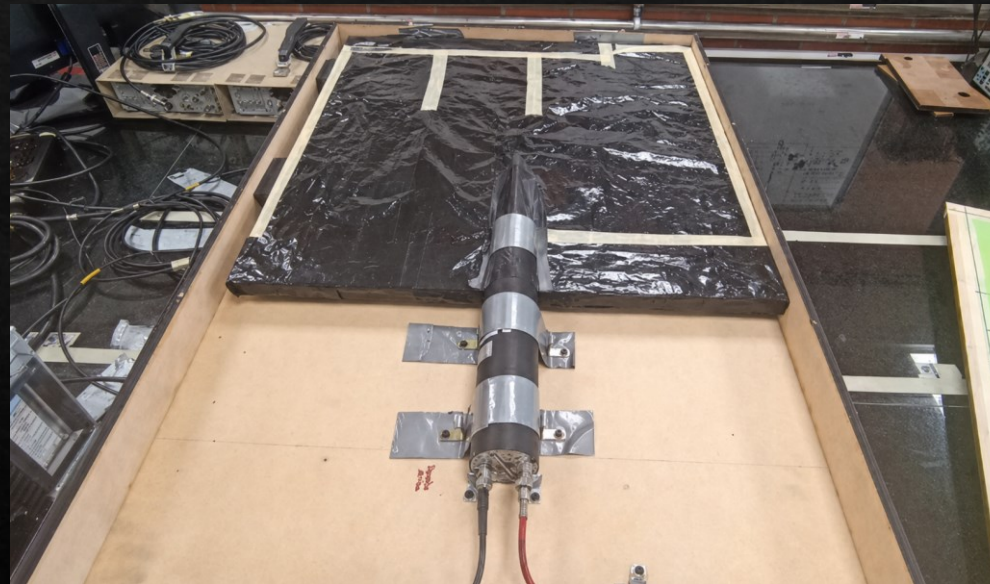
Parte **Trigger** Externo



Señal lógica que marca cuándo un evento debe ser aceptado y registrado.

Placas Centelladoras

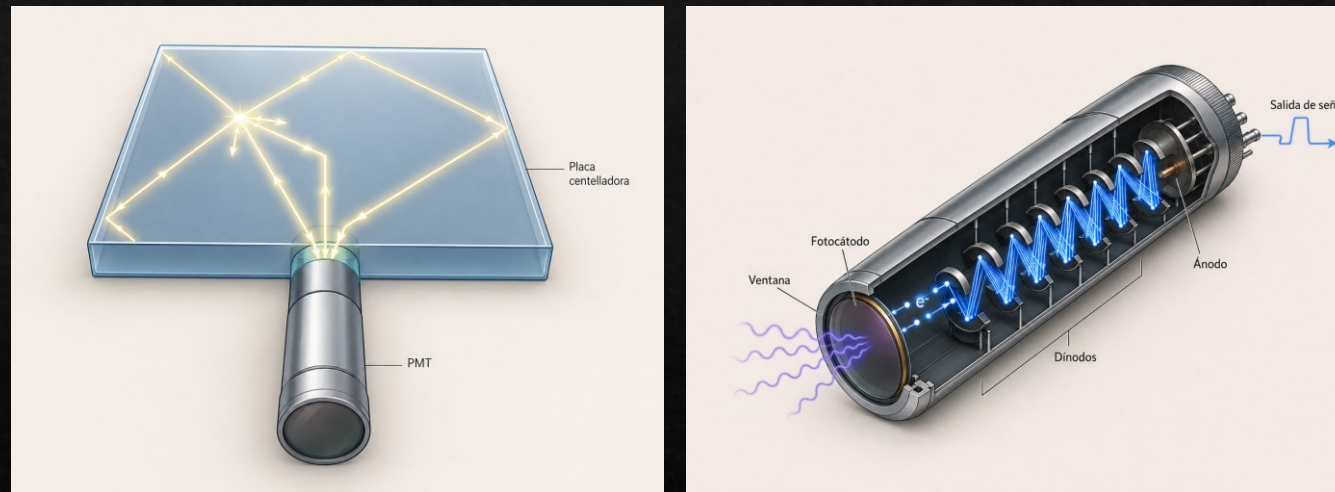
Las **placas centelladoras** son láminas de centellador plástico **BC-408** de 60cm x 60 cm x 1 cm ubicadas en los extremos del sistema. Su función principal es actuar como trigger externo: cuando ambas placas registran señal en coincidencia, se valida que una partícula atravesó el volumen activo del detector.



Fotografía de una de las placas centelladoras usadas.

PMT (*Photomultiplier Tube*)

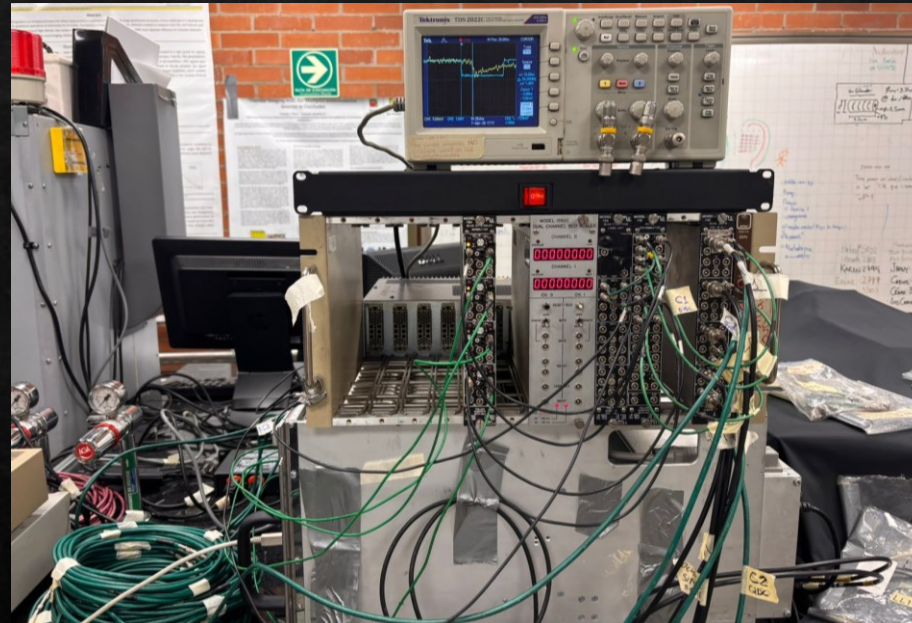
Son fotodetectores al vacío que convierten luz débil en pulsos eléctricos amplificados mediante un fotocátodo, que libera electrones al recibir luz, y una cadena de dinodos, que multiplica esos electrones hasta producir una señal eléctrica detectable. En el hodoscopio, las placas centelladoras están acopladas a PMTs y se operan con alto voltaje, aproximadamente -2000V .



Ilustraciones del funcionamiento de un PMT en las placas centelladoras.

Electrónica NIM/CAMAC

La electrónica **NIM** (*Nuclear Instrumentation Module*) se usa para tratar señales rápidas y construir la lógica de trigger, mientras que **CAMAC** (*Computer Automated Measurement And Control*) se usa para registrar información de carga y tiempo.

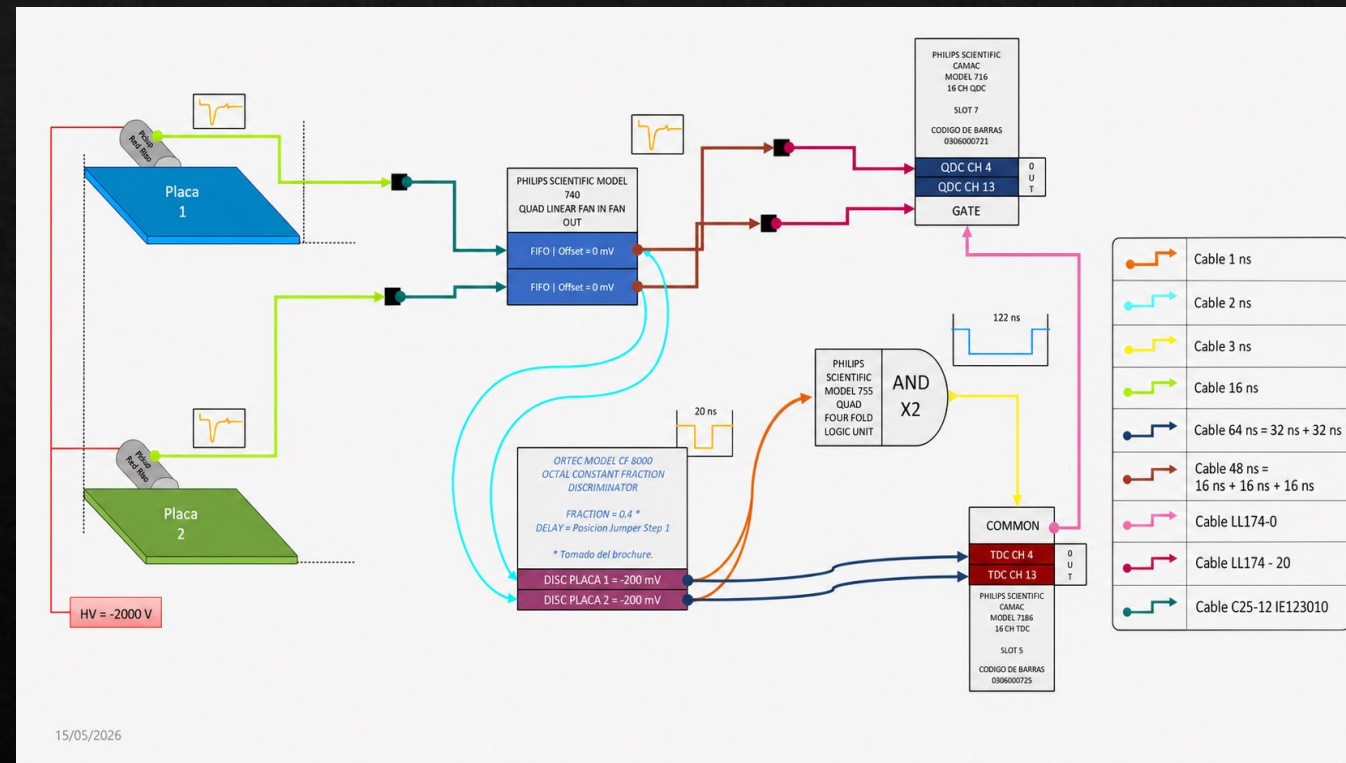


Fotografía del montaje NIM/CAMAC con fines ilustrativos.

(Escogimos NIM/CAMAC en este caso para no usar una tarjeta CAEN entera solo para las placas)

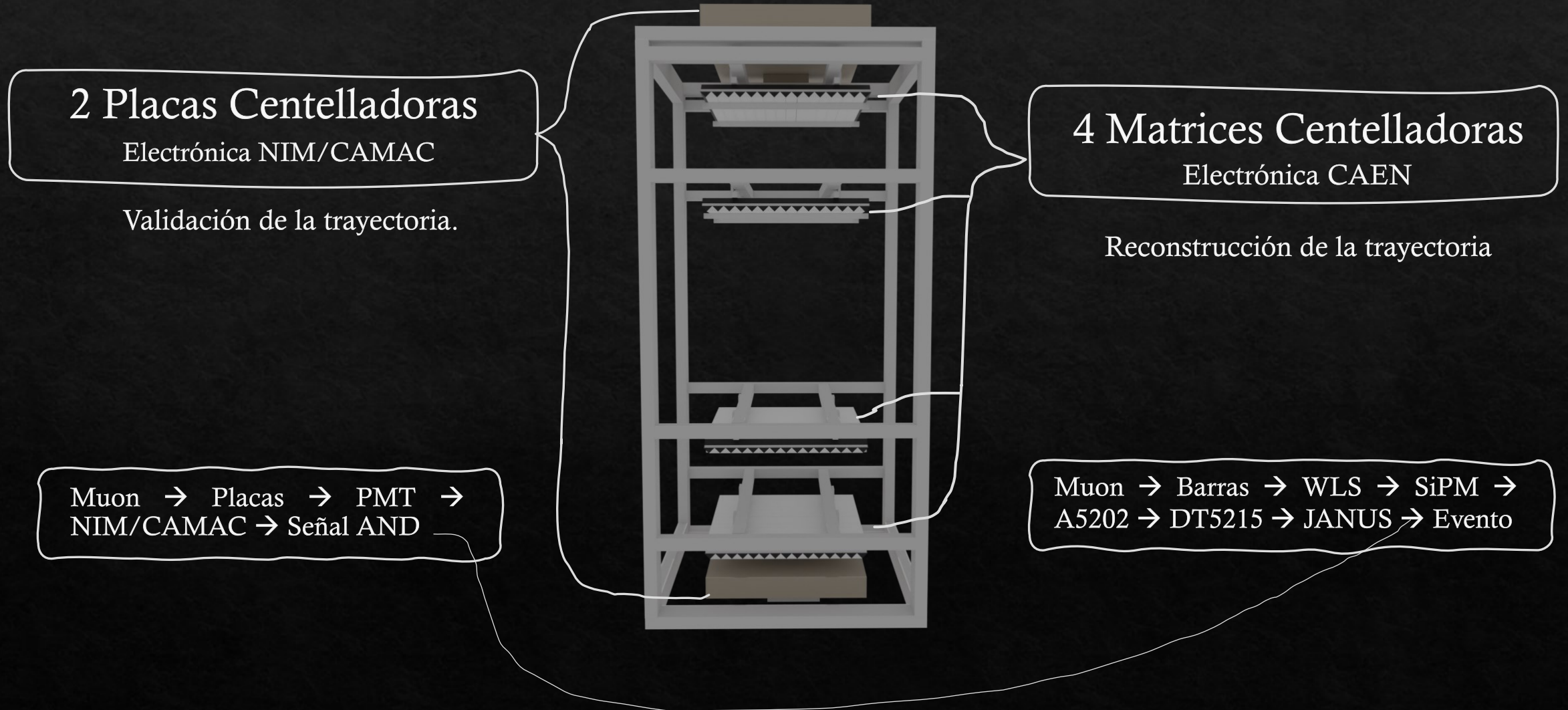
Electrónica NIM/CAMAC

Los PMT entregan señales analógicas que son procesadas por la cadena NIM/CAMAC. Con el Fan-In/Fan-Out y el discriminador se acondiciona la señal analógica y se convierte en una señal digital NIM, la unidad lógica construye la coincidencia AND entre placas y esa coincidencia se usa como trigger externo. Los módulos QDC/TDC (Charge/Time to Digital Converter) registran carga y tiempo del evento.

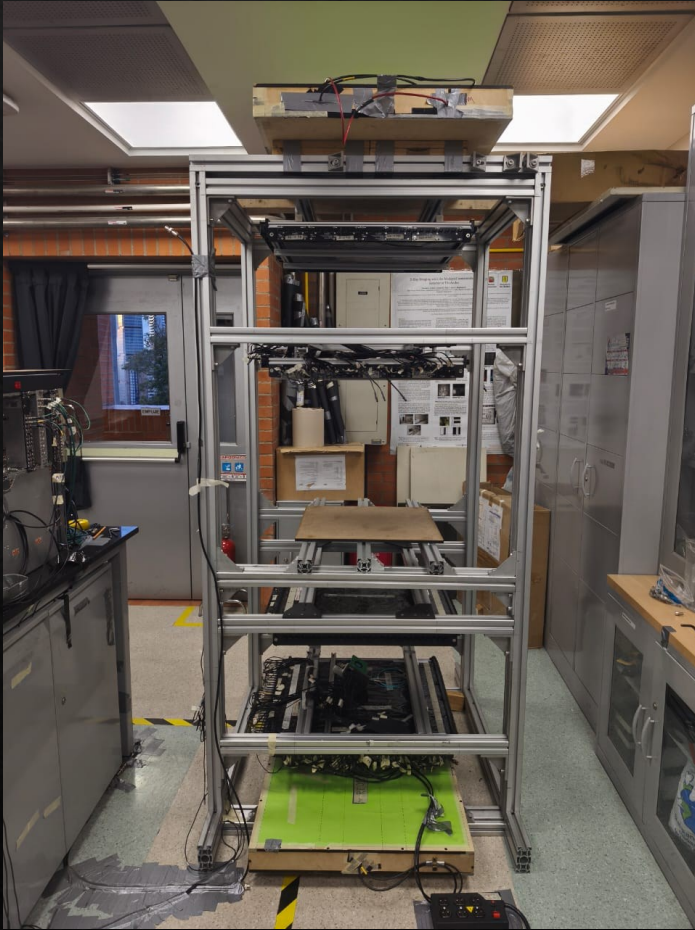


El Hodoscopio

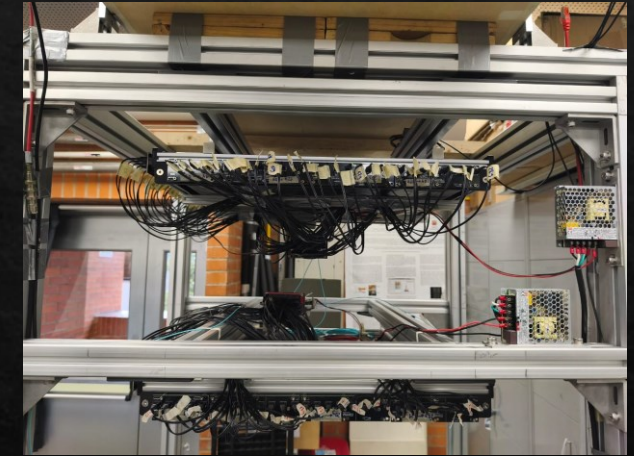
Montaje Esquemático



Montaje en el Laboratorio de Altas Energías

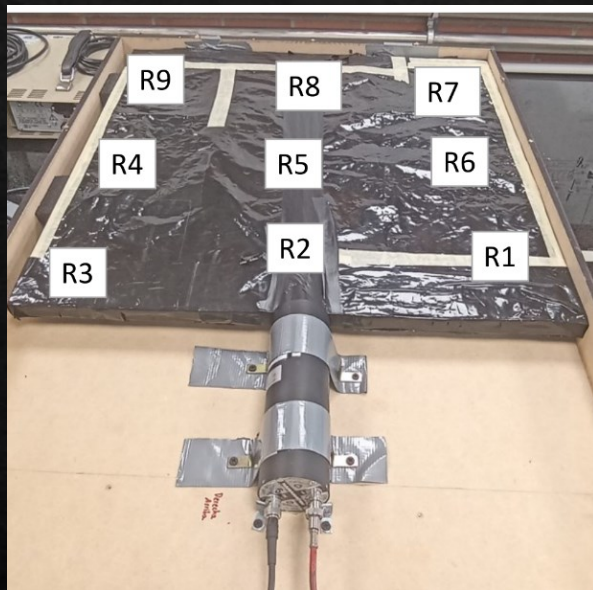


Fotografía del Hodoscopio.

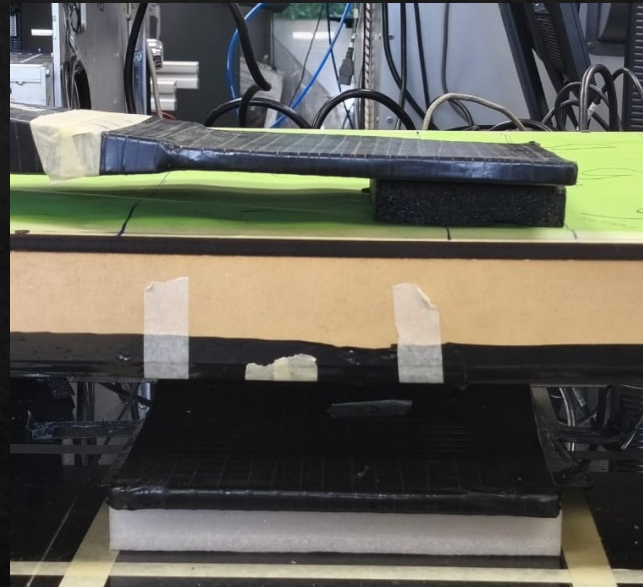


Fotografía de conexiones y posiciones de algunas matrices.

Eficiencia de Placas (Electrónica NIM)



Cada placa se dividió en 9 regiones para determinar la uniformidad de la eficiencia.

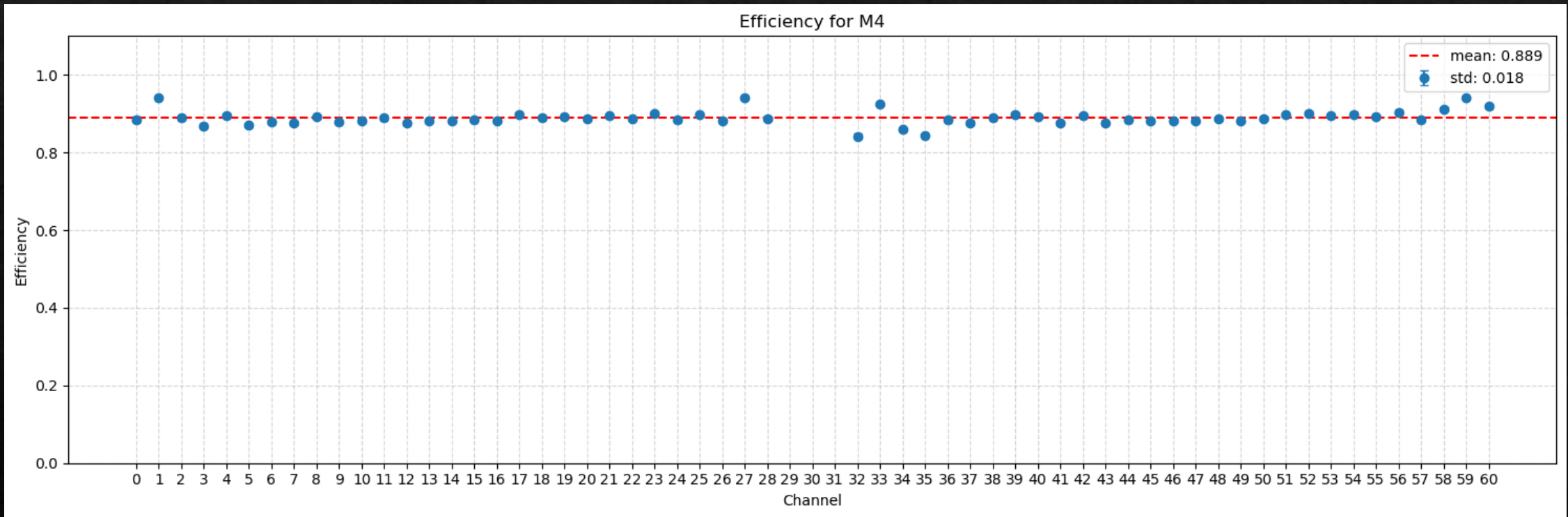


Se hizo un sándwich con dos paletas centelladoras pequeñas y cada placa para determinar conteos únicamente triples (N_3) y conteos únicamente dobles (N_2)

Región 9 98,71% ± 0,29%	Región 8 99,88% ± 0,09%	Región 7 99,80% ± 0,11%
Region 4 98,84% ± 0,28%	Region 5 99,77% ± 0,09%	Region 6 99,86% ± 0,10%
Región 3 98,27% ± 0,34%	Región 2 99,86% ± 0,10%	Región 1 99,24% ± 0,23%

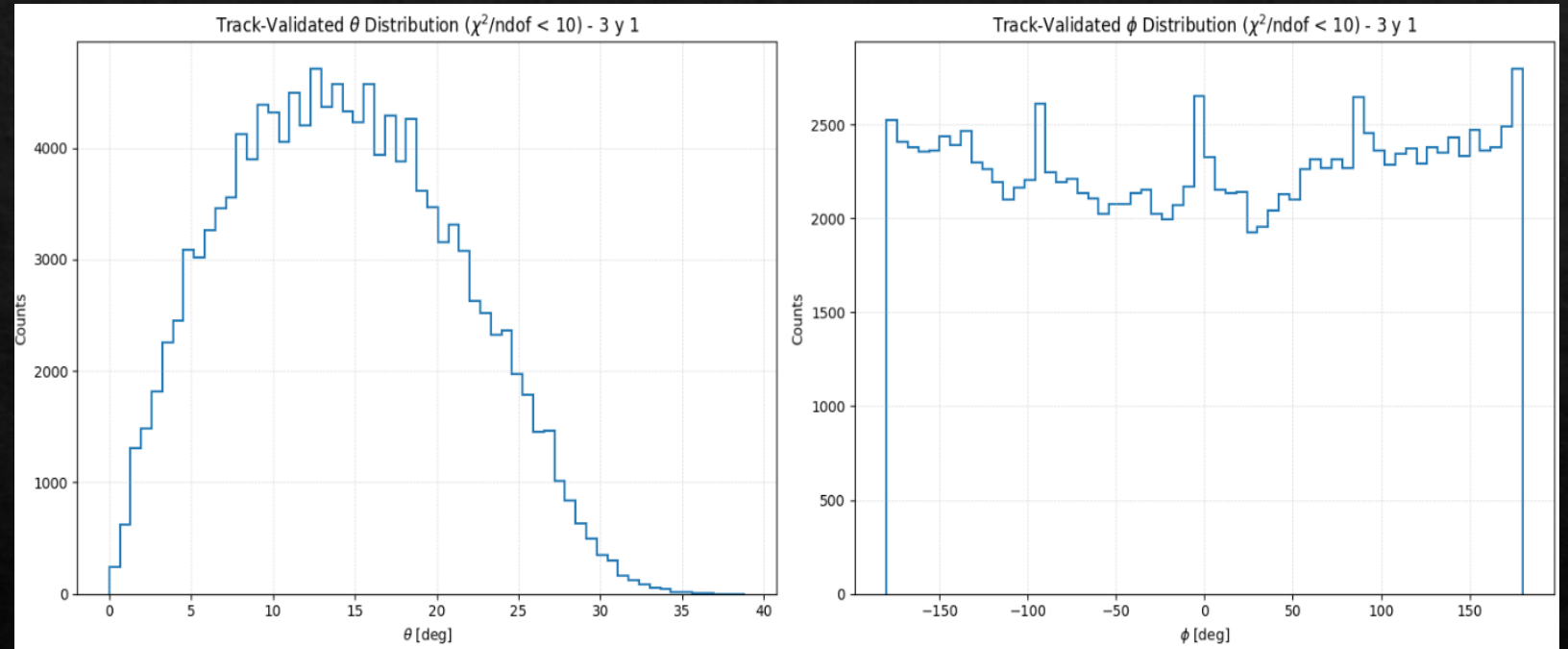
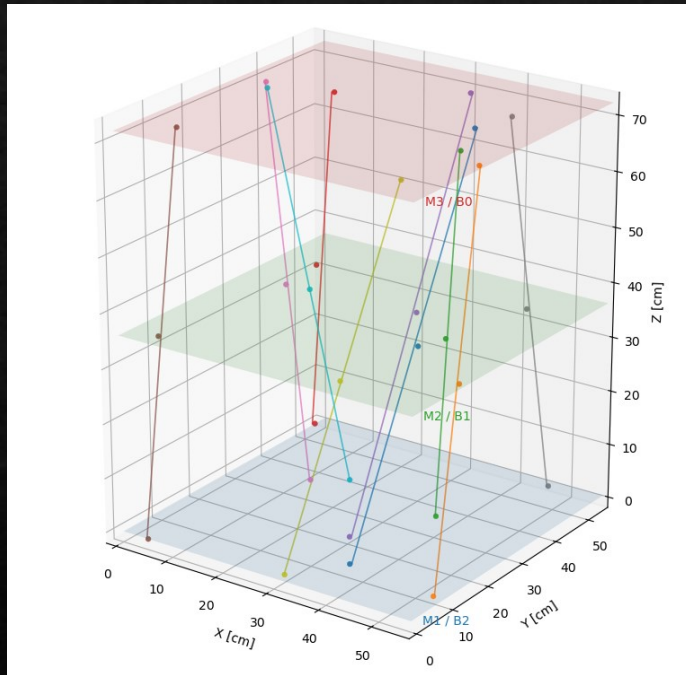
Para cada región se calculó la eficiencia usando $N_3/(N_2+N_3)$, obteniendo bastante uniformidad. Este resultado es para una de las placas.

Eficiencia de Matrices (Electrónica CAEN)



La eficiencia por barra se estimó usando los patrones de activación de la matriz. En una trayectoria ideal se esperan dos barras activas en X y dos en Y (C4). Cuando se observan dos barras en una dirección y una en la otra (C3), se interpreta como una posible barra no detectada. Para cada barra se hace la fracción $C4/(C3+C4)$. Este resultado es para una de las matrices.

Visualización de Trayectorias



Ejemplo de cómo se ven algunas de las trayectorias validadas reconstruidas en el caso de 3 matrices, junto con las distribuciones angulares cenitales y azimutales. Con todos los filtros utilizados se están descartando un 90% de los eventos.

Referencias

- [1] Guzmán Mejía, J. J. (2025). *Caracterización y primeras pruebas de un hodoscopio de matrices centelladoras para muografía* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].
- [2] Luxium Solutions. (s. f.). *BC-400, BC-404, BC-408, BC-412, BC-416 premium plastic scintillators* [Datasheet].
- [3] Luxium Solutions / Saint-Gobain Crystals. (s. f.). *BCF-92 wavelength shifting optical fiber* [Datasheet].
- [4] Hamamatsu Photonics. (s. f.). *MPPC S13360 series: Multi-Pixel Photon Counter* [Datasheet].
- [5] Hamamatsu Photonics. (s. f.). *MPPC S13360-3075PE* [Datasheet / ficha técnica].
- [6] Hamamatsu Photonics. (s. f.). *MPPC S13360-1375PE* [Datasheet / ficha técnica].
- [7] CAEN S.p.A. (s. f.). *FERS-5200: Front-End Readout System* [Datasheet].
- [8] CAEN S.p.A. (2023). *A5202/DT5202: 64-channel Citiroc-1A unit for FERS-5200* (User Manual UM7945, Rev. 4).
- [9] CAEN S.p.A. (2022). *JANUS: CAEN FERS-5200 readout software* (User Manual UM7946, Rev. 2).
- [10] CAEN S.p.A. (s. f.). *A52xx accessories for FERS-5200 board inputs* [Datasheet].
- [11] Venaruzzo, M., Abba, A., Tintori, C., & Venturini, Y. (2020). *FERS-5200: A distributed Front-End Readout System for multidetector arrays*. arXiv:2010.15688.
- [12] Berthold Technologies. (s. f.). *Silicon photomultipliers for radiometry*. Berthold Technologies.
- [13] ORTEC. (s. f.). *Model CF8000 octal constant fraction discriminator* [Manual / datasheet].
- [14] PHILIPS Scientific. (s. f.). *Model 740 quad linear Fan-In/Fan-Out* [Manual / datasheet].
- [15] PHILIPS Scientific. (s. f.). *Model 755 quad four-fold logic unit* [Manual / datasheet].
- [16] PHILIPS Scientific. (s. f.). *Model 7166 charge-to-digital converter* [Manual / datasheet].
- [17] PHILIPS Scientific. (s. f.). *Model 7186 time-to-digital converter* [Manual / datasheet].