



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Estudio Experimental sobre la Homogeneidad de la
Respuesta de un SiPM

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Emmanuel López Juárez

Asesorado por

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández & Dr. Eduardo Moreno Barbosa

Puebla Pue.
11 de junio de 2025

II

ilo



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Estudio Experimental sobre la Homogeneidad de la
Respuesta de un SiPM

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Emmanuel López Juárez

Asesorado por

Dr. Cristian Heber Zepeda Fernández & Dr. Eduardo Moreno Barbosa

Puebla Pue.
11 de junio de 2025

Título: Estudio Experimental sobre la Homogeneidad de la Respuesta de un SiPM

Estudiante: EMMANUEL LÓPEZ JUÁREZ

COMITÉ

...
Presidente

...
Secretario

...
Vocal

...
Vocal

Dr. Cristian Heber Zepeda
Fernández
Asesor

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Asesor

Dedicatoria

A mis padres Julián y Betty, por su apoyo incondicional; a mi hermana Fernanda, por ser mi confidente de vida; a mi abuela Lupita y mi tía Mary, quienes siempre estarán en mi corazón; a mis amigos Zaira y Rodolfo, por su amistad sincera; a mis compañeros de carrera, por los momentos compartidos; y a todos los profesores que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal.

Agradecimientos

Agradezco profusamente al profesor Adolfo por inspirarme a seguir aprendiendo y superarme cada día. A la profesora Silvia, por los retos que me ayudaron a crecer, y a los profesores Heber y Lucio, por su paciencia y dedicación al enseñarme. A mis amigos de la carrera, Carlos, Karla y Brandon, quienes estuvieron conmigo en los momentos difíciles. También agradezco a mis compañeros de laboratorio, Giovanna, Edmundo y Johan, por contribuir a un ambiente de trabajo enriquecedor y positivo.

Índice general

Resumen	XV
Introducción	XVII
1. Teoría	1
2. Estado del arte	5
3. Materiales y programas utilizados	7
4. Metodología	11
5. Resultados	17
6. Discusión	23
7. Conclusiones	25
Anexo	29

Índice de figuras

2.1.	<i>Ejemplo de la respuesta uniforme del ánodo del PMT de Hamamatsu. Imagen recuperada de la hoja de datos del PMT H8500, H8500B.</i>	6
3.1.	<i>Fotografía del kit Educativo CAEN. Se muestran algunos de los dispositivos usados para el estudio.</i>	7
3.2.	<i>Impresora usada para la impresión del soporte del SiPM.</i>	8
3.3.	<i>Captura de pantalla de la cuenta en donde se diseñaron las piezas del soporte. Se observan algunos de los planos detallados de las piezas.</i>	8
3.4.	<i>Captura de pantalla del software HERA con los paneles interactivos y la ventana de "Waveform".</i>	10
4.1.	<i>Fotografía del Fotomultiplicador de Silicio Modelo MicroFC 60035-SMT de la marca SensL.</i>	12
4.2.	<i>Fotografía del conjunto de soportes para la fibra óptica. La entrada de luz está designada de acuerdo a las regiones establecidas para este estudio</i>	13
4.3.	<i>Diseño final de la carcasa armada en AutoCAD.</i>	14
4.4.	<i>Diagrama del experimento con las modificaciones pertinentes para realizar el análisis de la superficie.</i>	15
4.5.	<i>Arreglo experimental usado en la adquisición de datos. Es posible observar el software HERA en su opción de caracterización.</i>	16
5.1.	<i>Medias por sección de la superficie analizada, agrupadas según el tamaño del área de exposición. Cada punto representa la media obtenida en una región específica del SiPM. Los colores indican el tamaño del área de exposición: rojo para 0.4 mm, azul para 0.7 mm y verde para 1 mm. Cada punto corresponde a una clave de identificación.</i>	18
5.2.	<i>Visualización de la distribución de carga en la superficie. Diámetro del área de exposición de 0.4 mm</i>	19
5.3.	<i>Distribución de carga obtenida de los datos recopilados de acuerdo al área de exposición.</i>	20
5.4.	<i>Medias calculadas por área de exposición.</i>	21
6.1.	<i>Mapa de las áreas analizadas con sus medias correspondientes al conteo ADC de cada una de las áreas de exposición de luz.</i>	24

Índice de tablas

4.1. <i>Mapa de las regiones estudiadas en el SiPM. Se muestran coordenadas cartesianas para diferenciar y etiquetar cada región.</i>	14
5.1. <i>Medias obtenidas clasificadas de acuerdo con el diámetro de exposición de luz. Los datos muestran las medias por región en conteos ADC y separados en columnas de acuerdo al área de exposición de luz.</i>	17
5.2. <i>Registro las integrales de las curvas de los histogramas de cada grupo.</i>	20
5.3. <i>Registro de medias y desviaciones estándar del análisis de datos por grupos determinados por el diámetro de exposición de luz.</i>	21
5.4. <i>Registro los valores P y F de las pruebas ANOVA.</i>	21

Resumen

En este trabajo se evaluó la respuesta homogénea de un fotomultiplicador de silicio (SiPM) modelo MicroFC 60035-SMT de SenseL, utilizando el kit educativo **SP5600AN - Educational Kit - Premium Version** de CAEN. Se implementaron mediciones en diferentes áreas de la superficie del SiPM, variando el diámetro de exposición de la luz incidente (1 mm, 0.7 mm y 0.4 mm). Para ello, se diseñó y utilizó una carcasa impresa en 3D modelo Bambu Lab Carbon X1 [1] que permitió aislar el SiPM de la luz ambiental. Los datos recolectados se analizaron mediante pruebas ANOVA para determinar la existencia de diferencias significativas en la respuesta de la superficie. Es posible observar que el SiPM presenta variaciones estadísticamente significativas de acuerdo a la posición y el diámetro de exposición, lo que indica falta de uniformidad en la respuesta.

Introducción

La detección de fotones es una herramienta fundamental en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas, especialmente en áreas como la medicina, la astrofísica, la física de partículas y la tecnología en obtención de imágenes. Detectar fotones con precisión permite obtener información crucial en diferentes contextos, desde la observación de procesos biológicos hasta la medición de eventos subatómicos en aceleradores de partículas. Por ejemplo, en medicina nuclear, los detectores de fotones son esenciales para la tomografía por emisión de positrones (PET), mientras que en astrofísica permiten el estudio de rayos cósmicos y otros fenómenos astronómicos y en física de partículas, su uso es indispensable para registrar eventos en experimentos de alta energía.

Con los avances tecnológicos, se han desarrollado dispositivos como los cristales centelladores, tubos foto-multiplicadores (PMT) y foto-multiplicadores de silicio (SiPM). Entre ellos, los SiPM han emergido como una innovación clave debido a sus características únicas: son altamente sensibles a la luz, resistentes a campos magnéticos, ligeros y capaces de operar a voltajes más bajos. Estas ventajas los hacen ideales para aplicaciones como la detección de partículas en experimentos de alta energía, el monitoreo de radiación en instalaciones nucleares y el desarrollo de sistemas avanzados de imágenes médicas.

En el entorno académico, contar con dispositivos como los SiPM facilita su estudio y caracterización. Este proceso incluye medir parámetros clave como la sensibilidad a la luz, la eficiencia de detección de fotones, la resolución temporal, la linealidad de la respuesta y el rango dinámico. El principal enfoque de este trabajo está en la sensibilidad a la luz, dada su relevancia en la evaluación de la uniformidad de la señal en la superficie del detector.

Aunque los SiPM han sido objeto de numerosos estudios, es común encontrar análisis que no cubren de manera exhaustiva toda la superficie del dispositivo. Esto plantea una preocupación, ya que algunas regiones podrían mostrar variaciones en la respuesta de la señal, afectando la precisión en aplicaciones donde la uniformidad es crítica, como en la reconstrucción de imágenes de alta resolución. También se plantea la posibilidad de las variaciones en la superficie de acuerdo al tiempo de uso del dispositivo, así como los daños presentes en la superficie del mismo. Por este motivo, la importancia de analizar la respuesta de diferentes áreas del SiPM para determinar si existen diferencias significativas en su sensibilidad a la luz, dependiendo de la región que interactúa con la misma, debe ser considerada como un estudio adicional, así como las consideraciones de su uso y los posibles daños del detector.

Este análisis ayuda a evaluar la uniformidad de la respuesta en aplicaciones específicas para que, a su vez, se identifiquen áreas de mejora en el diseño de los SiPM. Al comprender mejor estas variaciones, es posible realizar ajustes en el diseño, optimizar el rendimiento y garantizar una operación confiable en aplicaciones críticas, como la detección de radiación en entornos médicos o la medición precisa de fotones en experimentos de física de partículas. Los resultados contribuirán al

desarrollo de dispositivos más eficientes y uniformes, sentando las bases para futuras investigaciones en la caracterización y mejora de detectores de silicio en aplicaciones científicas y tecnológicas.

Capítulo 1

Teoría

Históricamente, los tubos foto-multiplicadores (PMT) fueron utilizados para la detección de fotones en entornos de bajo ruido lumínico dado que contienen la capacidad para amplificar señales débiles. Sin embargo, la tecnología de los PMT presentaba ciertos inconvenientes, especialmente en el ruido electrónico; este inconveniente limitaba su sensibilidad y dificultaba el reconocimiento de fotones con energías cercanas o menores a las del ruido registrado (fotones de baja energía).

Con el tiempo, las limitaciones observadas en los PMT impulsaron avances en tecnología de detección de fotones, dando paso al desarrollo de fotodiodos semiconductores (fotomultiplicadores de avalancha o APD) y, eventualmente, a los fotomultiplicadores de silicio (SiPM). Dichas nuevas tecnologías ofrecieron un control más preciso sobre la ganancia de señal y un factor de ruido reducido, mejorando significativamente la calidad de las mediciones en comparación con los PMT tradicionales.

Desde 2003, investigaciones clave, como las de P. Buzhan y B. Dolgoshein, establecieron las bases para el uso de los SiPM en aplicaciones científicas. En su artículo “*Silicon Photomultiplier and Its Possible Applications*” [2], se demostró el potencial de los SiPM al comparar su respuesta con la de otros detectores, incluyendo los centelladores plásticos. Posteriormente, en 2004, B. Dolgoshein amplió este estudio en su publicación “*Silicon Photomultiplier in Particle Physics: Possibilities and Limitations*” [3], donde examinó las capacidades de conteo de fotones, la ganancia, la eficiencia de detección y el tiempo de respuesta de los SiPM, destacando sus ventajas y aplicaciones en física de partículas.

A nivel de diseño, los SiPM representan una evolución de los foto-multiplicadores de avalancha, caracterizándose por su bajo factor de ruido, eficiencia de detección de fotones superior a la de los PMT de vacío, además de contar con un bajo voltaje de operación ($\approx 24V$) [4]. Estos atributos han convertido a los SiPM en una herramienta versátil y eficaz para la detección fotónica en aplicaciones que demandan alta precisión.

Funcionamiento del SiPM

Un fotomultiplicador de silicio (SiPM, por sus siglas en inglés) es un detector de estado sólido basado en microceldas (APDs) sensibles a la luz. Cada microcelda consta de un diodo avalancha

operado en modo de ruptura, lo que permite la amplificación de señales individuales. El SiPM combina características de alta ganancia, bajo ruido y resolución temporal precisa, lo que lo hace ideal para aplicaciones en física de partículas, medicina e instrumentación.

Un término clave es el voltaje de ruptura (V_{br}), que es el nivel de voltaje aplicado al SiPM necesario para generar una avalancha en las microceldas.

El SiPM estudiado, modelo MicroFC 60035-SMT, tiene un voltaje de ruptura de 24.7 V.

El voltaje de operación (V_{op}) es ligeramente mayor que el voltaje de ruptura, típicamente por una diferencia de 2 – 5 V. Esta diferencia, denominada **overvoltage** (ΔV), permite que las avalanchas sean iniciadas de manera eficiente al absorber un fotón. En este trabajo, el SiPM se operó a un voltaje de 28.5 V.

Una de las limitaciones inherentes de los SiPM es el **ruido oscuro**, que se origina por eventos de avalancha espontáneos debido al ruido térmico, electrónico y a los daños de la superficie del SiPM. Este ruido puede ser mitigado mediante el control preciso de la temperatura y el uso de circuitos de compensación, como los incluidos en el kit educativo CAEN.

Otra característica importante del SiPM es su capacidad para distinguir señales individuales. Esto se debe a que cada microcelda responde de manera uniforme, lo que resulta en histogramas de respuesta con picos equidistantes, correspondientes a múltiplos de la carga básica generada por un fotón incidente.

La eficiencia de detección del SiPM depende de la relación entre la probabilidad de avalancha y la capacidad del dispositivo para absorber fotones. En el modelo MicroFC 60035-SMT, la eficiencia de detección varía con la longitud de onda incidente, alcanzando un máximo cercano al espectro visible. Para optimizar la sensibilidad, el dispositivo incluye una matriz de 18,980 microceldas, cada una de 35 μm de lado, lo que permite una cobertura uniforme de la superficie activa.

El SiPM opera de manera lineal mientras la luz incidente no exceda la capacidad de las microceldas para recuperar su estado inicial. En caso de saturación, las celdas permanecen en estado de avalancha y la respuesta se desvía de la proporcionalidad esperada. Esto se controla variando la intensidad de luz incidente y evaluando las curvas de saturación.

El funcionamiento de los dispositivos detectores de fotones, incluidos los SiPM, está basado en efectos físicos fundamentales que facilitan la conversión de luz en señales eléctricas. Entre estos, el efecto fotoeléctrico es esencial para entender cómo se procesan los fotones y cómo el diseño del material del SiPM optimiza su desempeño.

Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico, formulado por Albert Einstein en 1905, es un fenómeno en el cual " *la luz incide sobre una superficie metálica y produce la emisión de electrones.* " [5] En los SiPM, los fotones incidentes generan pares electrón-hueco en el silicio, siempre que la energía de los fotones supere el umbral (*threshold*) fotoeléctrico del material. Estos pares son separados por un campo eléctrico aplicado, generando una corriente medible.

Fotodiodo

Es un dispositivo semiconductor basado en una unión p-n que opera como sensor de luz. Al incidir fotones sobre la región sin portadores de carga móviles de la unión, se genera una corriente eléctrica proporcional a la intensidad luminosa. Este fenómeno ocurre gracias al efecto fotoeléctrico interno, mediante el cual los fotones incidentes generan pares electrón-hueco en el material semiconductor, típicamente silicio.

Cuando el fotodiodo se polariza inversamente, el campo eléctrico presente en la región sin portadores de carga móviles (capa de agotamiento) separa los portadores generados: los electrones son atraídos hacia la región tipo n y los huecos hacia la región tipo p, estableciendo así una fotocorriente. Esta corriente es directamente proporcional a la cantidad de luz absorbida, lo que permite al fotodiodo funcionar como un detector preciso de intensidad luminosa.

La sensibilidad y velocidad de respuesta del fotodiodo lo hacen adecuado para aplicaciones como detección óptica, sensores de imagen y dispositivos de obtención de imágenes médicas.

Capítulo 2

Estado del arte

Habiendo establecido los fundamentos teóricos sobre el funcionamiento y ventajas de los SiPMs, resulta necesario contextualizar este estudio dentro del panorama de investigaciones previas.

El desarrollo de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM) revolucionó el campo de la detección fotónica, ofreciendo mejoras significativas en comparación con los tubos fotomultiplicadores (PMT) tradicionales. Según Dolgoshein, en su artículo “*Status report on silicon photomultiplier development and its applications*” [6], los SiPMs destacan por su capacidad de detección con bajo ruido y alta eficiencia. Dicho trabajo presenta un análisis detallado de las posibles aplicaciones de los SiPM en contextos científicos y médicos, resaltando su capacidad para sustituir a los PMTs en ciertas aplicaciones críticas.

Desde su salida al mercado en 2003, los SiPMs han encontrado aplicaciones en física de partículas, imagen médica y otras áreas donde la precisión en la detección de fotones es esencial. Es muy relevante su capacidad para operar a bajo voltaje, lo que reduce el consumo energético y mejora la estabilidad operativa.

El estudio de Eckert, titulado “*Characterisation studies of silicon photomultipliers*” [4], es uno de los más significativos en la caracterización experimental de los SiPMs. En este artículo se desarrolló un montaje experimental específico para medir la homogeneidad de respuesta en diferentes regiones del dispositivo. La metodología empleada incluyó el uso de fuentes de luz controladas y técnicas estadísticas avanzadas para evaluar las variaciones en la respuesta del SiPM.

La caracterización de los SiPMs es una práctica común que garantiza su desempeño. Este estudio destacó la importancia de controlar variables como el ruido oscuro y la temperatura para obtener resultados consistentes y que registraran los eventos resultantes de los efectos físicos esperados.

Los estudios comparativos entre PMTs y SiPMs han demostrado que estos últimos ofrecen ventajas significativas en términos de homogeneidad de respuesta y reducción de ruido. Aunque los PMTs fueron pioneros en la detección de fotones, su tecnología se ha visto limitada por problemas de sensibilidad y ruido electrónico. Los SiPMs, en cambio, han demostrado ser mejores y más eficaces en condiciones de baja iluminación; pero los estudios de los PMTs toman en cuenta la respuesta en toda la superficie [7] como se muestra en la Imagen 2.1.

El presente estudio busca proporcionar una visión más integral, evaluando la homogeneidad

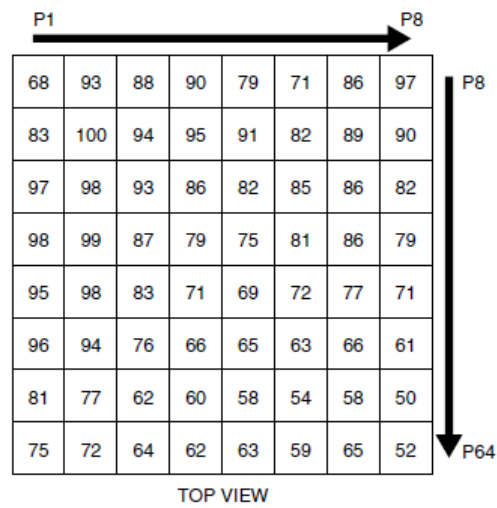


Figura 2.1: *Ejemplo de la respuesta uniforme del ánodo del PMT de Hamamatsu. Imagen recuperada de la hoja de datos del PMT H8500, H8500B.*

en toda la superficie del SiPM y su relación con las variaciones del diámetro de exposición de luz. Dicha experimentación permitirá obtener datos más completos y contribuir al desarrollo de aplicaciones más precisas en física experimental.

Capítulo 3

Materiales y programas utilizados

Kit CAEN

Se utilizó el kit educativo **SP5600AN - Educational Kit - Premium Version** de **CAEN**, que incluye un SiPM modelo **Hamamatsu S10362-11-100C**. Este kit consta de un LED driver (**SP5601**), una fuente de voltaje con amplificación (**SP5600**), un digitalizador (**DT5720A**) y una fibra óptica rígida adaptada a la entrada del soporte del SiPM del kit.



Figura 3.1: *Fotografía del kit Educativo CAEN. Se muestran algunos de los dispositivos usados para el estudio.*

Impresora 3D.

Impresora de la marca BambuLab modelo X1 Carbon visible en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Impresora usada para la impresión del soporte del SiPM.

Programa AutoCAD.

Programa de diseño AutoCAD 2023 - Español (Spanish). Pantalla de inicio en la Figura 3.3, registrado con una cuenta institucional para el uso de la licencia.

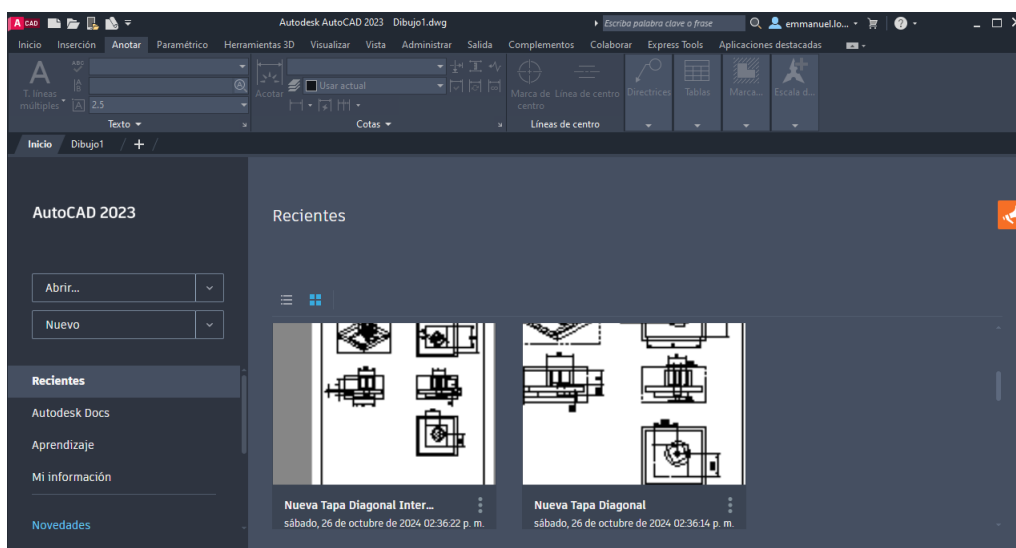


Figura 3.3: Captura de pantalla de la cuenta en donde se diseñaron las piezas del soporte. Se observan algunos de los planos detallados de las piezas.

Programas de simulación de impresión.

Bambu Studio versión oficial.

UltiMaker Cura versión 5.2.2.

Materiales de impresión

Se utilizaron PLA, PLA-CF y TPU para hacer las pruebas de impresión. Además, en esos materiales, se probaron los colores blanco, azul y negro.

Materiales extra para el arreglo experimental

Caja forrada con piel sintética negra, manta y plastilina negra.

Programa HERA by CAEN

En la Figura 3.4 se muestra el programa para realizar la captura de datos. Como el software está enfocado a varias prácticas, se utilizó el apartado de "*Characterization of SiPM*", abrir los paneles interactivos "*Digitizer interactive Panel*" y "*Power Supply & Amplification Unit Interactive Panel*" para poder modificar los parámetros de lectura y adquisición de datos del software. Los paneles se abren en la pestaña de "*Hardware*" de la ventana principal una vez que se ha abierto el apartado para caracterización de un SiPM.

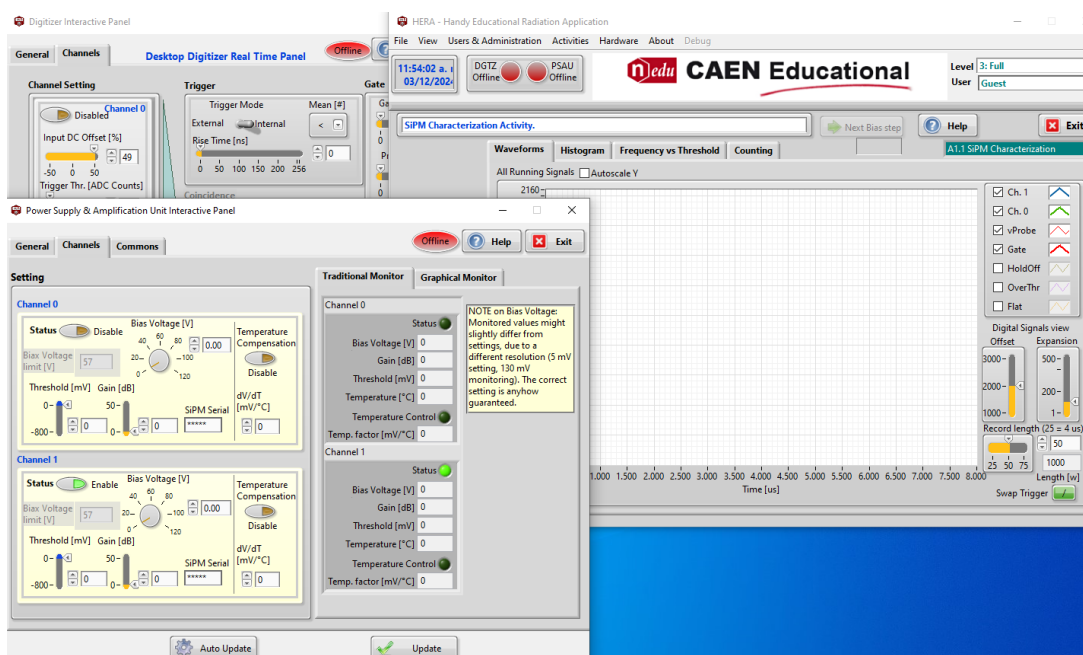


Figura 3.4: Captura de pantalla del software HERA con los paneles interactivos y la ventana de "Waveform".

Capítulo 4

Metodología

El manual operativo del kit CAEN incluye un montaje experimental diseñado para caracterizar el SiPM provisto, así como instrucciones detalladas para configurarlo mediante el software HERA. Para la realización del experimento, se adaptó el diseño experimental para analizar un SiPM diferente al que originalmente incluye el kit. Este enfoque aprovechó al máximo el arreglo experimental original, adaptándolos a un modelo externo de fotomultiplicador de silicio.

Para investigar la respuesta homogénea de un SiPM en el contexto del montaje experimental propuesto por el manual del Kit Educativo CAEN, se desarrolló un estudio que analiza la señal en múltiples puntos de su superficie, variando el diámetro de exposición a la luz incidente sobre la superficie. Este planteamiento cuantitativo tiene por objetivo principal el identificar la homogeneidad de la respuesta mediante pruebas ANOVA, las cuales permiten evaluar diferencias significativas entre regiones de incidencia de la luz y áreas de exposición. La metodología combinó un esquema de medición preciso con un proceso de análisis estadístico para verificar la existencia de una señal constante en toda la superficie del SiPM o la falta de una respuesta homogénea significativa en función de la posición y el área de incidencia de la luz.

Se empleó un SiPM modelo MicroFC 60035-SMT de SensL, calibrado a un voltaje operativo de 28.5 V. Con una superficie de 6mm × 6mm y con 18,980 microceldas[8]. El SiPM requirió una estructura específica para minimizar la exposición a la luz ambiental y mejorar la precisión de las mediciones. El experimento se llevó a cabo utilizando los elementos del kit educativo de CAEN: LED Driver, fuente de voltaje con amplificador y el digitalizador; todos fueron controlados a través del software HERA. Este software permitió la monitorización en tiempo real y la exportación de los datos de señal para un análisis estadístico más profundo.

Selección de Materiales y Pruebas Preliminares

Se realizaron pruebas preliminares con diversos materiales para establecer cuál sería el más adecuado para la impresión de la carcasa, probando PLA y TPU en varios colores y diferentes densidades de relleno, con el objetivo de analizar el efecto de estos factores en la reducción de la incidencia de luz ambiental. También se hicieron pruebas con diferentes diseños hasta encontrar un diseño óptimo de acuerdo a lo requerido por el experimento.

Inicialmente, se diseñó una carcasa simple: una caja que permitiera introducir el SiPM ensamblado sobre una tarjeta electrónica, con una tapa para sellar la entrada de la tarjeta y un orificio circular que dejara expuesto el SiPM en su totalidad. Ese diseño inicial es muy similar al ocupado por el soporte del SiPM utilizado en el manual de experimentos del kit. Comenzamos las pruebas de material de impresión con TPU, y después se continuaron con PLA probando colores blanco, azul y negro, además de experimentar con diferentes grosores de las paredes de la carcasa y diversas cantidades de relleno (variable que determina la cantidad de material entre las paredes), comenzando con un 20 %. Los modelos de color blanco y azul fueron descartados, ya que no ofrecían una protección suficiente contra la luz ambiental, como se observó en las pruebas realizadas con un osciloscopio. Sin embargo, el color negro mostró ser una opción viable, por lo que se continuó experimentando con ese color y con diferentes grosores. Se investigó además el PLA-CF, que contiene fibra de carbono y permite obtener un acabado en color negro mate.

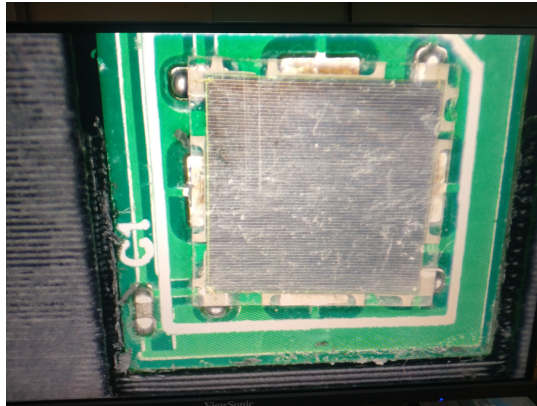


Figura 4.1: *Fotografía del Fotomultiplicador de Silicio Modelo MicroFC 60035-SMT de la marca SensL.*

Finalmente, se seleccionó PLA-CF negro mate, con un relleno del 100 % y un grosor de pared de 2 mm, ya que este material mostró una alta capacidad de bloqueo de luz sin necesidad de aumentar el grosor de las paredes. Las pruebas de efectividad en el bloqueo de luz ambiental revelaron que incrementar el grosor de las paredes no mejoraba significativamente la protección contra la luz ambiental ni disminuía las interferencias por partículas incidentes.

Durante los ensayos iniciales, se probaron diferentes tapas para el soporte de la fibra óptica. Aunque inicialmente se diseñó una tapa circular ajustada a las dimensiones del SiPM y de la entrada de la fibra óptica del kit, finalmente se adoptó un diseño cuadrado con una entrada de fibra circular, lo que garantizó una mayor precisión en la selección de las áreas de exposición en la superficie del SiPM al terminar en un conjunto de soportes que permitieran apuntar a diferentes regiones de la superficie del SiPM. A pesar de la efectividad de la carcasa para los propósitos del experimento, aún persistía cierto nivel de ruido ambiental que afectaba la correcta lectura de la respuesta del SiPM. Para solucionar este problema, se optó por utilizar una caja forrada con piel sintética y cubrirla con una manta negra, con el SiPM dentro de la misma. Esta solución permitió reducir el ruido ambiental, llevándolo a niveles adecuados para realizar las mediciones de manera precisa.



Figura 4.2: Fotografía del conjunto de soportes para la fibra óptica. La entrada de luz está designada de acuerdo a las regiones establecidas para este estudio

Diseño final de la carcasa

La carcasa del SiPM fue diseñada con dos objetivos principales en el esquema experimental: por un lado, proporcionar soporte y estabilidad al SiPM, asegurando su acoplamiento preciso con el montaje descrito en el manual del kit educacional; por otro lado, se debía facilitar el análisis de homogeneidad en la respuesta del SiPM mediante la orientación, esto se logró al limitar la entrada de la luz en áreas específicas de su superficie. El diseño de la carcasa se realizó tomando como referencia las dimensiones tomadas de la tarjeta en la que se montó el SiPM, garantizando un encaje que ofrece soporte y aislamiento para evitar el daño estructural al dispositivo. Además, se consideraron las dimensiones originales del arreglo experimental propuesto en el manual, ya que la altura del montaje experimental permite que la fibra óptica quede totalmente paralela al área del montaje y mantiene rígida la fibra (evitando que la misma se dañe). Adicionalmente, se designó la densidad del material en el software de impresión 3D para minimizar la entrada de luz ambiental.

Se imprimieron tres conjuntos de cinco tapas de soporte para la fibra óptica, cada una con un diámetro de entrada de luz específico (1 mm, 0.7 mm y 0.4 mm). Estas tapas permiten analizar áreas puntuales de la superficie del SiPM, comenzando en el centro, y luego desplazándose a 1.5 mm y 2.5 mm en dirección perpendicular a uno de los lados, así como a aproximadamente $\sqrt{4.5}$, mm y $\sqrt{12.5}$, mm en diagonal hacia el ángulo de la superficie del detector. Tras el secado del material PLA-CF, se observó una expansión de 0.11 mm en el material por pared, lo cual se consideró en el diseño final para garantizar la precisión dimensional. La entrada de luz de menor diámetro (0.4 mm) fue realizada mediante perforación manual con una broca de diámetro preciso.

Finalmente, se añadió una capa de plastilina negra entre la tapa del soporte de la fibra óptica y el soporte principal de la tarjeta del SiPM. Esto proporcionó una fijación adicional, reduciendo al mínimo el movimiento de la carcasa y protegiendo el SiPM de la luz ambiental que podría incidir en la superficie del detector.

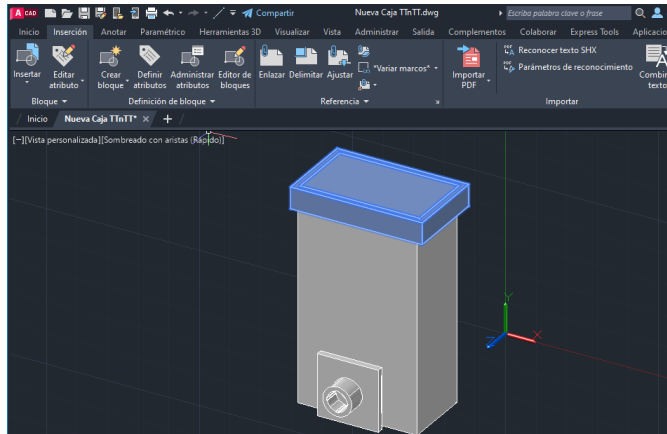


Figura 4.3: *Diseño final de la carcasa armada en AutoCAD.*

Arreglo Experimental

Dado que el experimento buscó evaluar la respuesta en términos de homogeneidad del SiPM mediante una serie de mediciones en diferentes posiciones y variando el diámetro de exposición a la luz. La superficie del SiPM se dividió en 25 secciones cuadradas de 1.2 mm x 1.2 mm. Este tamaño fue seleccionado tomando como referencia el diámetro inicial de exposición de luz (1 mm), dejando un pequeño margen alrededor de la fibra óptica para garantizar una distribución uniforme de la luz. Las dimensiones de cada región propuesta coinciden con las 25 regiones representadas en la Figura 5.4, correspondientes a las dimensiones del SiPM (6 mm x 6 mm), asegurando que cada sección cubra completamente el área de exposición sin superposiciones. Se analizaron las variaciones en la media y desviación estándar de los eventos registrados y se emplearon pruebas ANOVA para determinar la existencia de diferencias significativas entre las distintas regiones de exposición y diámetros de incidencia.

(1,5)	(2,5)	(3,5)	(4,5)	(5,5)
(1,4)	(2,4)	(3,4)	(4,4)	(5,4)
(1,3)	(2,3)	(3,3)	(4,3)	(5,3)
(1,2)	(2,2)	(3,2)	(4,2)	(5,2)
(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)	(5,1)

Tabla 4.1: *Mapa de las regiones estudiadas en el SiPM. Se muestran coordenadas cartesianas para diferenciar y etiquetar cada región.*

El modelo de SiPM utilizado fue el MicroFC 60035-SMT de SensL, cuyo rango operativo es de 27 a 31 V. Después de realizar varias pruebas para determinar el mejor voltaje de operación en función de los objetivos de este experimento y el ruido ambiental presente durante la toma de datos, se ajustó a 28.5 V. Este SiPM ha estado en uso durante cinco años, lo que ha provocado cierto desgaste en su superficie, como se muestra en la Figura 4.2. Este desgaste podría generar una variación en la respuesta del SiPM en comparación con las especificaciones originales de su hoja de datos.

Configuración del Software HERA

Con el equipo calibrado y el SiPM en su posición óptima dentro de la caja forrada y oscurecida, se procedió a encender la fuente de voltaje y a ajustar los parámetros en el software. En la ventana "Waveform", como se muestra en la Figura 3.4, se aseguró que el sistema estuviera adecuadamente configurado al variar los parámetros para integrar la señal del pulso, siendo los valores óptimos los siguientes: gate a 808 ms, pre-gate a 104 ms, holdoff a 1000 ms, ganancia a 20 y un umbral de 0 mV. La recopilación de datos se llevó a cabo durante 600 segundos por cada región, exportando los datos al finalizar cada medición para su posterior análisis estadístico.

Acoplamiento del nuevo SiPM

Debido a que se trabajó con un kit educacional cuyos experimentos son predeterminados, no fue posible retirar alguno de los dispositivos para hacer el estudio de este documento. Además, fue necesaria la confirmación de la conexión del digitalizador y el amplificador para utilizar todas las funciones necesarias para el estudio del SiPM en el software HERA.

El SiPM a analizar se colocó en la carcasa impresa en 3D, junto con la tapa de soporte para la fibra óptica correspondiente al área de análisis. Como se muestra en la Imagen 4.5, el soporte completo fue colocado dentro de una caja con forro negro sintético y cubierta con una manta negra antes de colocar la tapa de la caja. Se hizo una perforación para permitir el ingreso de la fibra óptica en su correspondiente soporte, minimizando la exposición de luz ambiental. La caja ya cuenta con adaptaciones para permitir la conexión de cables.

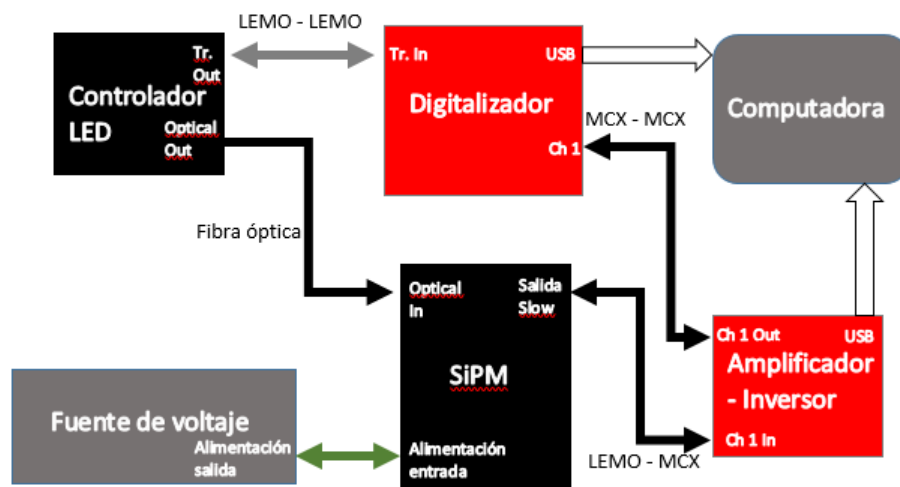


Figura 4.4: Diagrama del experimento con las modificaciones pertinentes para realizar el análisis de la superficie.

El voltaje de alimentación del SiPM se ajustó con un multímetro y la fuente de voltaje se activó únicamente en el momento de cada medición, previniendo interferencias y el registro de luz ambiental durante el proceso de cambio de región de exposición.

La tarjeta SiPM cuenta con una salida de señal "slow" con entrada de cable tipo LEMO, sin embargo, la entrada al amplificador es de tipo MCX, por lo que se buscó un cable con ambas entradas para poder conectar el SiPM al amplificador.

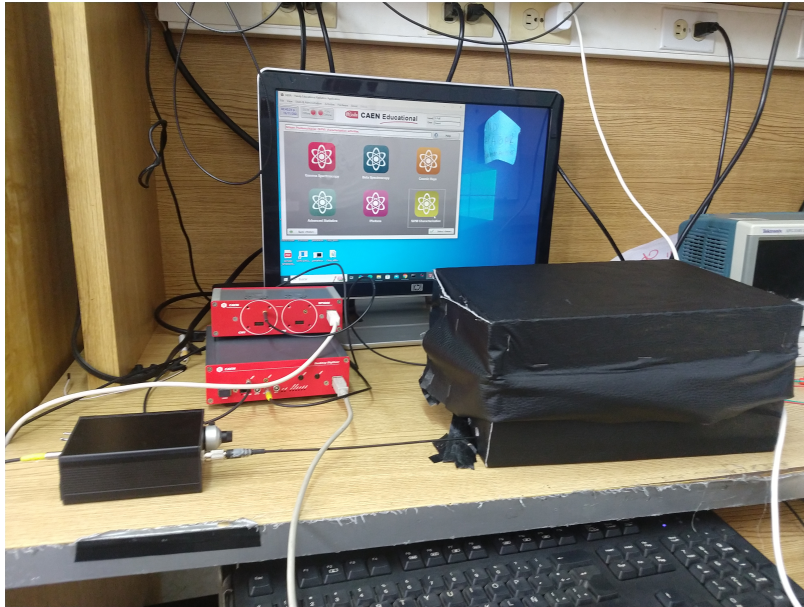


Figura 4.5: Arreglo experimental usado en la adquisición de datos. Es posible observar el software HERA en su opción de caracterización.

El diagrama presentado en la Figura 4.4 muestra las conexiones de los dispositivos presentes en el experimento de caracterización del kit educativo para el análisis de un SiPM externo al kit.

Capítulo 5

Resultados

Registro de datos

Las medias calculadas para cada región, clasificadas según el diámetro de exposición, se presentan en la Tabla 5.1. Los valores reflejan los conteos ADC registrados para las diferentes áreas de exposición.

Posición / Diámetro	1 mm	0.7 mm	0.4 mm
(1,1)	440.78	375.33	134.50
(1,3)	782.42	497.76	150.41
(1,5)	849.78	449.06	135.39
(2,2)	750.04	492.09	156.18
(2,3)	801.10	511.27	119.19
(2,4)	861.99	496.98	153.49
(3,1)	611.61	429.45	143.49
(3,2)	692.42	497.93	117.30
(3,3)	868.35	488.90	177.60
(3,4)	855.25	549.81	121.45
(3,5)	774.29	431.76	112.31
(4,2)	821.21	490.72	149.69
(4,3)	917.62	516.08	121.41
(4,4)	789.91	556.17	156.06
(5,1)	558.54	440.83	119.85
(5,3)	758.28	507.92	139.48
(5,5)	727.52	489.29	138.85

Tabla 5.1: *Medias obtenidas clasificadas de acuerdo con el diámetro de exposición de luz. Los datos muestran las medias por región en conteos ADC y separados en columnas de acuerdo al área de exposición de luz.*

En la Figura 5.1, las medias se presentan gráficamente agrupadas según el diámetro de exposición. Se incluyeron barras de desviación estándar de los datos de cada región, permitiendo observar las diferencias en la dispersión de los valores.

Los valores de medias generales y desviaciones estándar para cada diámetro se presentan en la Tabla 5.3. Estos valores reflejan la distribución promedio de los datos y la variabilidad observada en cada grupo analizado.

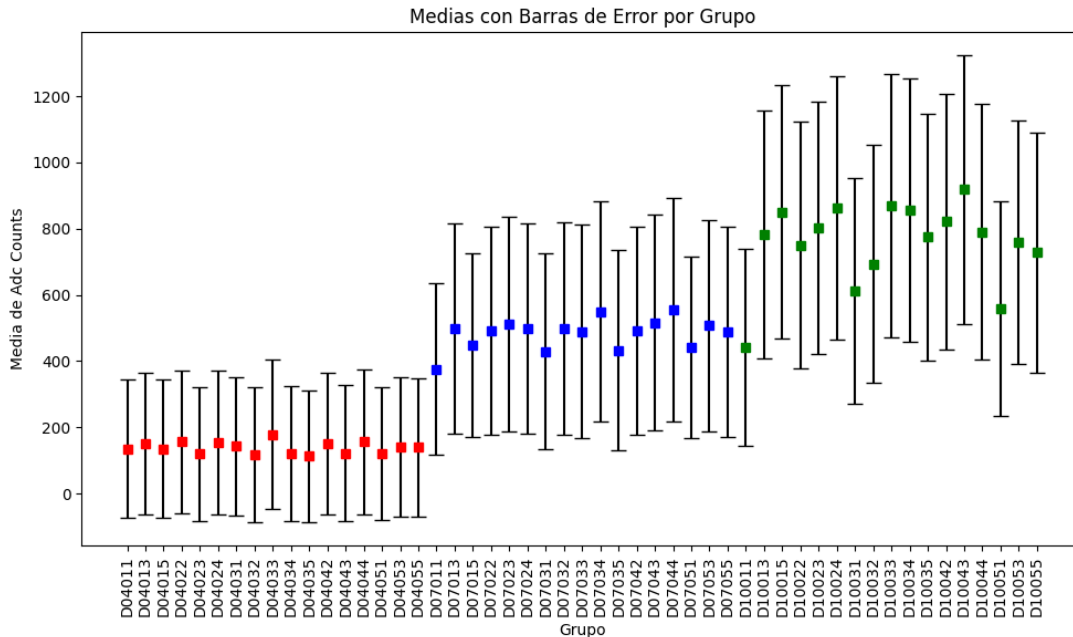


Figura 5.1: Medias por sección de la superficie analizada, agrupadas según el tamaño del área de exposición. Cada punto representa la media obtenida en una región específica del SiPM. Los colores indican el tamaño del área de exposición: rojo para 0.4 mm, azul para 0.7 mm y verde para 1 mm. Cada punto corresponde a una clave de identificación.

El análisis de los histogramas y las barras de error presentados en las Figuras 5.2 y 5.3 confirma que la dispersión en los datos está relacionada directamente con el diámetro de exposición. A medida que el diámetro aumenta, la variabilidad en los conteos ADC incrementa, lo que sugiere que la interacción simultánea con una mayor cantidad de microceldas del SiPM introduce una mayor fluctuación en la respuesta. Esta tendencia se observa claramente en la Figura 5.3, donde las barras de error son visiblemente más grandes en aperturas de 1 mm en comparación con diámetros más pequeños, como 0.4 mm.

A pesar de que el equipo utilizado ya viene calibrado para trabajar con el arreglo experimental original, es importante reconocer que este diseño introduce un offset fijo en los conteos ADC, lo cual no afecta el análisis de la homogeneidad de la respuesta del SiPM, ya que dicho desplazamiento es constante para todas las mediciones. En cuanto al aumento de la dispersión con el diámetro de exposición, los valores numéricos obtenidos en las desviaciones estándar, presentados en la Tabla 5.3, muestran cómo esta variabilidad aumenta con el diámetro de la apertura:

- 1 mm, la desviación estándar es de 122.78.
- 0.7 mm, la desviación estándar disminuye a 45.55.
- 0.4 mm, reduce aún más la desviación estándar, a 17.90.

Conteo ADC según la entrada de luz de 0.4 mm

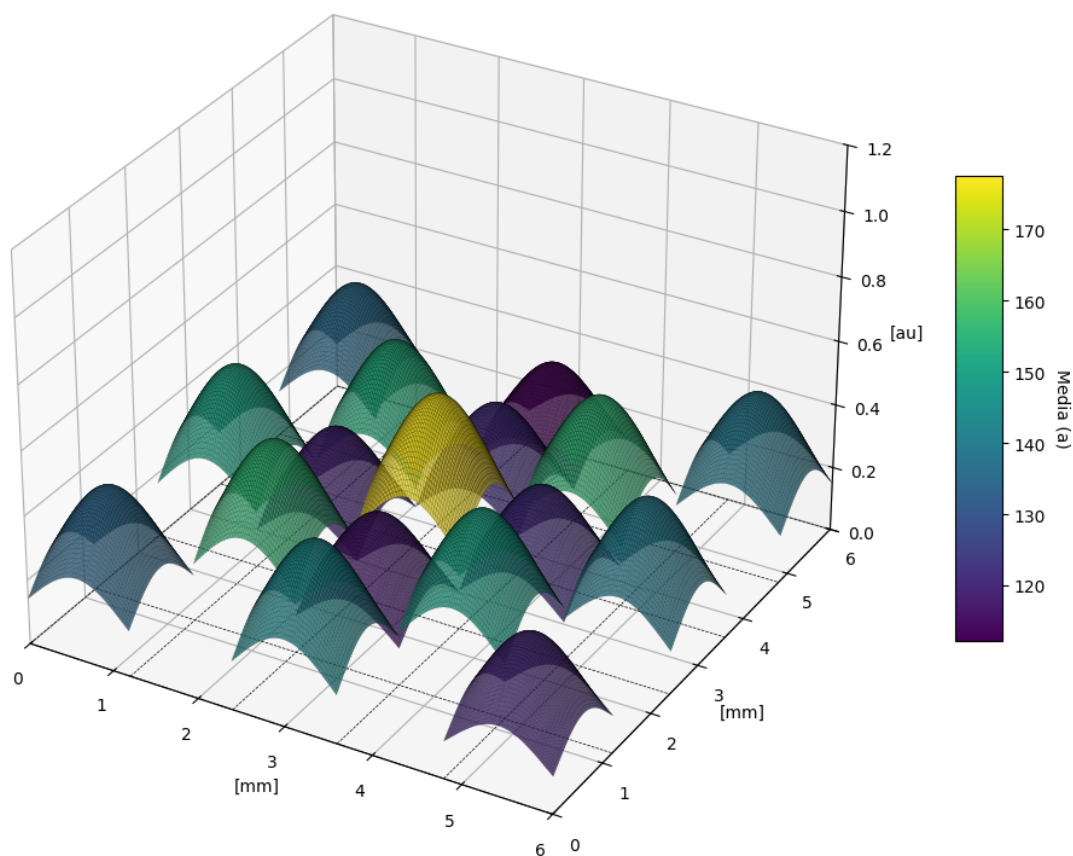


Figura 5.2: Visualización de la distribución de carga en la superficie. Diámetro del área de exposición de 0.4 mm

Estas diferencias indican que las medidas en áreas de mayor exposición son más susceptibles a la variabilidad debido a la interacción simultánea con un mayor número de microceldas del SiPM. Esta interacción incrementa la probabilidad de inconsistencias en la respuesta debido a factores como la distribución no uniforme de la ganancia entre microceldas y el ruido electrónico.

El impacto práctico de esta dispersión radica en la precisión requerida para aplicaciones específicas. Por ejemplo, en la reconstrucción de imágenes médicas, un aumento en la dispersión podría comprometer la resolución espacial al introducir incertidumbre en las señales detectadas; en experimentos de física de partículas, esta variabilidad puede dificultar la identificación precisa de eventos, especialmente en condiciones donde se necesita alta sensibilidad. Por tanto, sería recomendable optimizar el diámetro de exposición o implementar técnicas avanzadas de corrección de señal para minimizar estos efectos, garantizando un rendimiento más uniforme en el uso del SiPM.

En la Figura 5.4, las medias calculadas para cada diámetro de exposición se presentan junto con las barras de error que representan la desviación estándar y es posible observar los conteos ADC en la Figura 5.2.

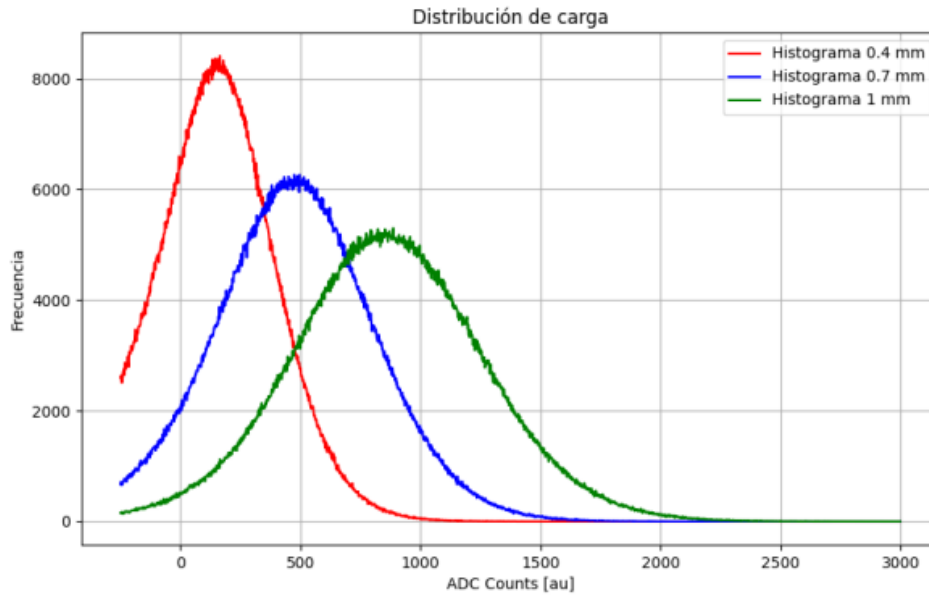


Figura 5.3: Distribución de carga obtenida de los datos recopilados de acuerdo al área de exposición.

Diámetro	1 mm	0.7 mm	0.4 mm
Integrales	4677644.00	4902508.67	5033988.00

Tabla 5.2: Registro las integrales de las curvas de los histogramas de cada grupo.

Resultados de pruebas ANOVA

Para saber si los datos y la respuesta son homogéneos en toda la superficie del SiPM, se utilizó un estudio ANOVA por medio de un código en Python que permitiera realizar ese análisis. Los datos se encuentran en la Tabla 5.4.

En todas las pruebas realizadas se utilizó un nivel de confianza del 95%, además de usar la misma hipótesis nula: "La respuesta de la superficie es homogénea".

Es posible observar que en cada una de las pruebas, se obtuvo un valor F muy alto y que el valor P de cada una fue 0. Todos los estudios concluyeron en el rechazo de la hipótesis nula.

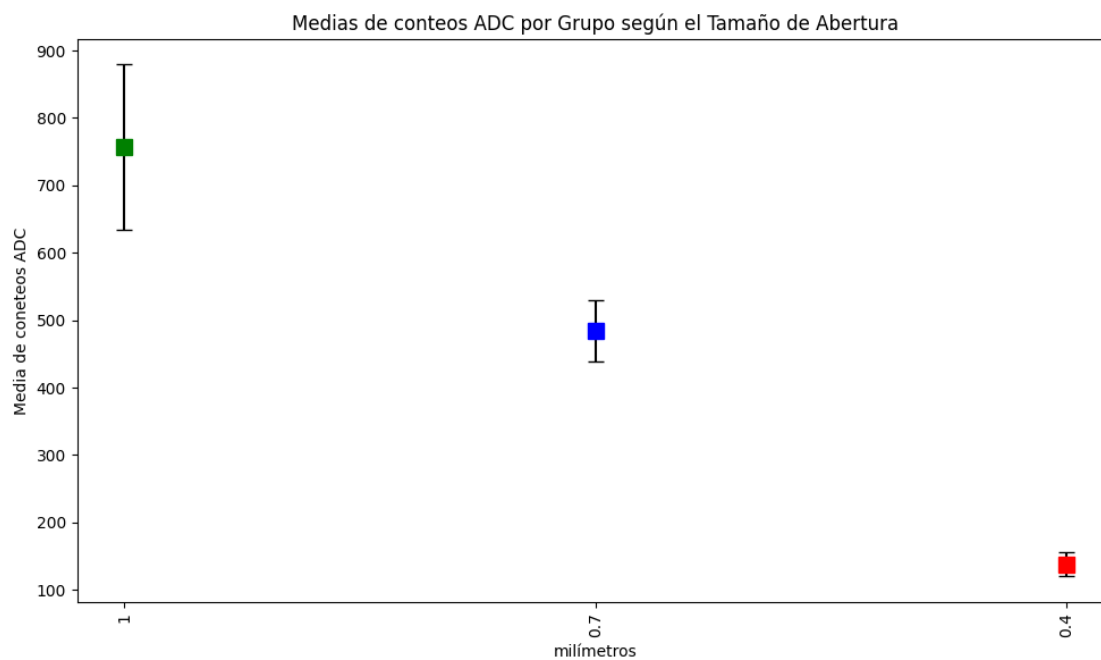


Figura 5.4: Medias calculadas por área de exposición.

Díámetro	1 mm	0.7 mm	0.4 mm
Medias	756.53	483.61	138.04
Desviación Estándar	122.78	45.55	17.90

Tabla 5.3: Registro de medias y desviaciones estándar del análisis de datos por grupos determinados por el diámetro de exposición de luz.

Díámetro	1 mm	0.7 mm	0.4 mm
Valor F	276427.1928	54938.0143	16683.5938
Valor P	0	0	0

Tabla 5.4: Registro las valores P y F de las pruebas ANOVA.

Capítulo 6

Discusión

Es posible observar cómo el conteo ADC es similar en cada una de las áreas de incidencia de la luz, pues la Tabla 5.2 muestra números con una diferencia de 131,479.00 cuentas ADC entre el diámetro de 0.4 y 0.7 mm, en comparación a las 356,344 cuentas ADC entre el diámetro de 0.4 y 1 mm; estas diferencias muestran un aumento de conteo ADC inversamente proporcional a la reducción del tamaño de exposición a la luz de la superficie del SiPM. Además, los histogramas en la Figura 5.3 marcan otro tipo de tendencia que involucra más a las desviaciones estándar registradas en la Tabla 5.3.

El análisis de los datos recopilados muestra que el diámetro de exposición tiene un efecto notable en la dispersión de los conteos ADC registrados. Como se detalla en la Tabla 5.3, las desviaciones estándar disminuyen significativamente al reducir el diámetro de exposición. En el caso de un diámetro de 1 mm, la desviación estándar alcanza 122.78, mientras que para 0.7 mm y 0.4 mm, los valores son 45.55 y 17.90, respectivamente. Esta variación sugiere que el número de microceldas involucradas en la detección está directamente relacionado con el aumento de la dispersión.

El SiPM utilizado en este estudio cuenta con 18,980 microceldas distribuidas uniformemente en su superficie activa de 6 mm \times 6 mm. Según estimaciones basadas en la geometría del dispositivo, un diámetro de exposición de 1 mm activa aproximadamente 1,410 microceldas. En diámetros más pequeños, como 0.7 mm y 0.4 mm, el número de celdas activadas se reduce a aproximadamente 690 y 250, respectivamente. Esta reducción en la cantidad de microceldas activadas con diámetros menores coincide con la disminución en la dispersión, lo que puede deberse a la interacción más localizada con una porción reducida del detector, minimizando las diferencias en la ganancia y el ruido entre las celdas activadas.

La influencia del diámetro de exposición también se refleja visualmente en las Figuras 5.3 y 6.1, donde los histogramas muestran cómo la dispersión de los datos es mayor para diámetros más grandes. Las barras de error asociadas con los conteos ADC son visiblemente más largas en aperturas de 1 mm en comparación con 0.4 mm. Esto sugiere que, a medida que aumenta el área de exposición, las diferencias intrínsecas entre las microceldas activadas tienen un impacto más pronunciado en la respuesta global del detector.

Además, el comportamiento observado podría estar relacionado con factores adicionales inherentes al diseño del SiPM, como la distribución de la ganancia entre las celdas, el ruido electrónico y las limitaciones asociadas con la recuperación de las microceldas tras una avalancha. Estas pro-

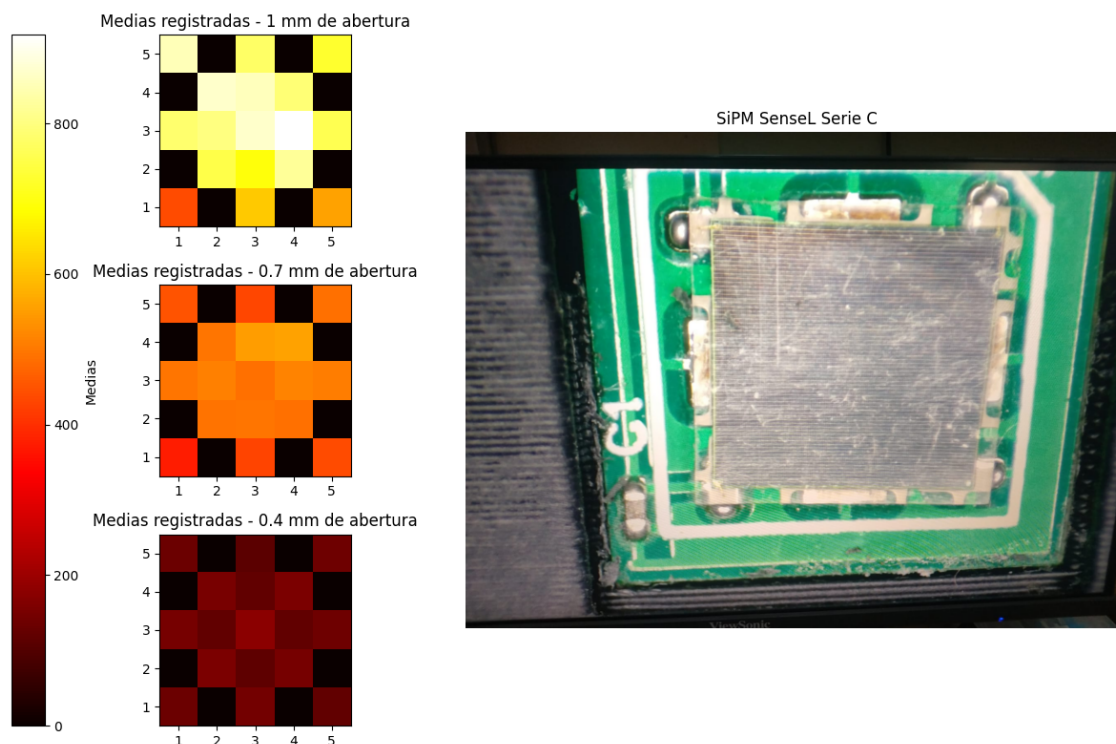


Figura 6.1: Mapa de las áreas analizadas con sus medias correspondientes al conteo ADC de cada una de las áreas de exposición de luz.

propiedades físicas del dispositivo pueden contribuir a la variabilidad observada en los conteos ADC y deben considerarse al interpretar los resultados de los experimentos con diferentes áreas de exposición.

Por último, es importante notar que estas variaciones no se distribuyen de manera uniforme en toda la superficie del detector. La Tabla 5.2 muestra que las medias de los conteos ADC varían entre las diferentes regiones analizadas, incluso para un mismo diámetro de exposición. Este fenómeno podría estar asociado con diferencias locales en la densidad de microceldas, así como con efectos de borde en las áreas periféricas del SiPM, donde las condiciones pueden diferir ligeramente de las del centro del dispositivo.

Capítulo 7

Conclusiones

Los resultados de las pruebas ANOVA confirman la falta de homogeneidad en la respuesta del SiPM MicroFC 60035-SMT, con diferencias significativas entre las medias de las regiones analizadas. Estas variaciones reflejan una distribución estadística desigual según la posición y el diámetro de exposición a la luz.

Como muestran las Tablas 5.1 y 5.3, y las Figuras 5.1 y 6.1, las regiones periféricas presentan menores conteos ADC que las centrales, una diferencia acentuada al reducir el diámetro de exposición. Este comportamiento podría atribuirse a la estructura de microceldas del SiPM y al posible desgaste de su superficie activa tras años de uso. Además, la respuesta no homogénea guarda similitudes con lo registrado en los estudios de los PMT (Figura 2.1), aunque con variaciones de rango diferente (54 a 100 de acuerdo a su estudio).

Aunque el SiPM no muestra fotopicos definidos similares a los registrados en algunos artículos, las curvas gaussianas obtenidas permiten evaluar la distribución de la respuesta. Este comportamiento se relaciona con una mayor cantidad de microceldas activas del dispositivo y los parámetros de operación empleados y específicos de cada SiPM. Los resultados indican una falta de homogeneidad en la respuesta del SiPM, influida probablemente por la densidad de microceldas, las condiciones de aislamiento lumínico, el daño estructural y las especificaciones de alineamientos del kit con respecto a su SiPM.

Un aporte clave de este estudio fue la implementación del kit CAEN SP5600AN y el programa HERA, que facilitaron la caracterización precisa del SiPM. Estas herramientas permitieron un control eficiente de parámetros como el voltaje de operación y la ganancia, además de proporcionar un mejor entorno para la visualización y análisis de datos en tiempo real.

En conclusión, este trabajo contribuye al entendimiento de las limitaciones de los SiPM y establece una base para su mejora en aplicaciones científicas y tecnológicas de alto impacto. La integración del kit CAEN y el programa HERA subraya la importancia de herramientas avanzadas para la caracterización de dispositivos modernos y permite que se estudien dispositivos ajenos al montaje experimental original en entornos educativos.

Bibliografía

- [1] X1 series Manuals. 9 de sep. de 2024. URL: <https://wiki.bambulab.com/en/x1/manual> (visitado 18-10-2024).
- [2] P Buzhan et al. “The advanced study of silicon photomultiplier”. En: Advanced technology and particle physics. World Scientific, 2002, págs. 717-728.
- [3] B Dolgoshein y B. Dolgoshein SIPM COLLABORATION: P. Buzhan. “Silicon photomultipliers in particle physics: possibilities and limitations”. En: Innovative Detectors for Supercolliders. World Scientific, 2004, págs. 442-456.
- [4] Patrick Eckert et al. “Characterisation studies of silicon photomultipliers”. En: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 620.2-3 (2010), págs. 217-226.
- [5] Matan. Efecto fotoeléctrico en física. | Cómo funciona, aplicación y ventajas. Jun. de 2023. URL: <https://your-physicist.com/es/efecto-fotoelectrico-en-fisica/>.
- [6] B Dolgoshein et al. “Status report on silicon photomultiplier development and its applications”. En: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 563.2 (2006), págs. 368-376.
- [7] HAMAMTSU. “FLAT PANEL TYPE MULTIANODE HOTOMULTIPLIER TUBE ASSEMBLY H8500, H8500B”. En: N/A. www.hamamatsu.com, 2002, pág. 3.
- [8] Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive C-Series SiPM Sensors. 12 de oct. de 2024. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf> (visitado 09-02-2022).

Anexo

Librerías utilizadas para el código en Python

```
1 import datetime
2 import matplotlib.image as mpimg
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5 import os
6 import pandas as pd
7 from datetime import datetime
8 !pip install fpdf
9 from fpdf import FPDF
10 from google.colab import drive
11 from matplotlib.gridspec import GridSpec
12 from scipy import stats
13 from scipy.integrate import simpson
14 from scipy.optimize import curve_fit
15
16 drive.mount('/content/drive')
```

Líneas de código en Python

```
1 file_path = '/content/drive/MyDrive/Ruta.xlsx'
2 df = pd.read_excel(file_path)
3
4 adc_counts, frequencies = df.iloc[:, 0], df.iloc[:, 1:]
5 expanded_data = [
6     (adc, col) for col in frequencies.columns
7     for adc, freq in zip(adc_counts, frequencies[col]) if pd.notna(freq)
8     for _ in range(int(freq))
9 ]
10 expanded_df = pd.DataFrame(expanded_data, columns=['Adc Counts', 'Grupo'])
11
12 group_stats = expanded_df.groupby('Grupo')['Adc Counts'].agg(['mean', 'std'])
13 anova_all = stats.f_oneway(*[group['Adc Counts'] for _, group in expanded_df.
14     groupby('Grupo')])
15 conclusion_all = f"Se {'rechaza' if anova_all.pvalue < 0.05 else 'no se rechaza'}
16     la hipótesis nula (p = {anova_all.pvalue:.4f})"
17
18 group_sizes = 17 # Asume 17 regiones por Área
19 groups = [frequencies.columns[i:i + group_sizes] for i in range(0, len(frequencies.
20     columns), group_sizes)]
21 mean_of_means = [
22     expanded_df[expanded_df['Grupo'].isin(group)].groupby('Grupo')['Adc Counts'].
23     mean().mean()
24     for group in groups
```

```

21 ]
22 anova_areas = stats.f_oneway(*[frecuencias[group].stack() for group in groups])
23 conclusion_areas = f"Se {'rechaza' if anova_areas.pvalue < 0.05 else 'no se rechaza
    '} la hipotesis nula (p = {anova_areas.pvalue:.4f})"
24
25 filtered_data = {col: (adc_counts[adc_counts < 3000], freq[adc_counts < 3000]) for
    col, freq in frecuencias.items()}
26 integrals = {col: simpsons(data[1], data[0]) for col, data in filtered_data.items()}
27
28 plt.figure(figsize=(10, 6))
29 means, stds = group_stats['mean'], group_stats['std']
30 plt.errorbar(range(len(means)), means, yerr=stds, fmt='o', capsiz=5, color='red')
31 plt.title('Medias con Barras de Error por Grupo')
32 plt.savefig('/content/drive/MyDrive/Grupo_Error_Barras.png')
33 plt.close()
34
35 plt.figure(figsize=(10, 6))
36 plt.errorbar(['1 mm', '0.7 mm', '0.4 mm'], mean_of_means, fmt='o', color='blue')
37 plt.title('Promedios de Areas de Exposicion')
38 plt.savefig('/content/drive/MyDrive/Area_Exposicion.png')
39 plt.close()
40
41 plt.figure(figsize=(12, 8))
42 for col, (x_f, freq_f) in filtered_data.items():
43     plt.plot(x_f, freq_f, label=f'Histograma {col}')
44 plt.legend()
45 plt.title('Histogramas por Grupo')
46 plt.savefig('/content/drive/MyDrive/Histogramas.png')
47 plt.close()
48
49 pdf = FPDF()
50 pdf.add_page()
51 pdf.set_font("Arial", size=12)
52
53 pdf.cell(200, 10, txt=f"Archivo analizado: {os.path.basename(file_path)}", ln=True)
54 pdf.cell(200, 10, txt=f"ANOVA (todos los datos): F = {anova_all.statistic:.4f}, p =
    {anova_all.pvalue:.4f}", ln=True)
55 pdf.cell(200, 10, txt=f"Conclusion: {conclusion_all}", ln=True)
56
57 pdf.cell(200, 10, txt=f"ANOVA (por areas): F = {anova_areas.statistic:.4f}, p = {
    anova_areas.pvalue:.4f}", ln=True)
58 pdf.cell(200, 10, txt=f"ConclusiÃşn: {conclusion_areas}", ln=True)
59
60 pdf.cell(200, 10, txt="Integrales de histogramas:", ln=True)
61 for col, integral in integrals.items():
62     pdf.cell(200, 10, txt=f"{col}: {integral:.2f}", ln=True)
63
64 pdf.add_page()
65 pdf.image('/content/drive/MyDrive/Grupo_Error_Barras.png', x=10, y=20, w=180)
66 pdf.add_page()
67 pdf.image('/content/drive/MyDrive/Area_Exposicion.png', x=10, y=20, w=180)
68 pdf.add_page()
69 pdf.image('/content/drive/MyDrive/Histogramas.png', x=10, y=20, w=180)
70
71 pdf.output('/content/drive/MyDrive/Resultados_Completos.pdf')

```

Código para mapear las medias y comprarlas con la superficie del SiPM

```

1
2
3 intensidades_1_mm = [849.78, 0, 774.29, 0, 727.52,
4                     0, 869.99, 855.25, 789.91, 0,

```

```

5         782.42, 801.10, 868.35, 917.62, 758.28,
6         0, 750.04, 692.42, 821.41, 0,
7         440.78, 0, 611.61, 0, 558.54]
8
9 intensidades_07_mm = [449.06, 0, 431.76, 0, 489.29,
10                    0, 496.98, 549.81, 556.17, 0,
11                    497.76, 511.27, 488.90, 516.08, 507.92,
12                    0, 492.09, 497.93, 490.72, 0,
13                    375.33, 0, 429.45, 0, 440.83]
14
15 intensidades_04_mm = [135.39, 0, 112.31, 0, 138.85,
16                    0, 153.49, 121.45, 156.06, 0,
17                    150.41, 119.19, 177.60, 121.41, 139.48,
18                    0, 156.18, 117.30, 149.69, 0,
19                    134.50, 0, 143.51, 0, 119.85]
20
21 matrix_1 = np.array(intensidades_1_mm).reshape(5, 5)
22 matrix_2 = np.array(intensidades_07_mm).reshape(5, 5)
23 matrix_3 = np.array(intensidades_04_mm).reshape(5, 5)
24
25 img_comparativa = mpimg.imread('/content/drive/MyDrive/Ruta.jfif')
26
27 fig = plt.figure(figsize=(12, 8))
28 gs = GridSpec(3, 3, width_ratios=[0.1, 1, 2], figure=fig)
29
30 colormap = plt.cm.hot
31 vmin = min(np.min(matrix_1), np.min(matrix_2), np.min(matrix_3))
32 vmax = max(np.max(matrix_1), np.max(matrix_2), np.max(matrix_3))
33
34 matrices = [matrix_1, matrix_2, matrix_3]
35 titulos = ['Medias registradas - 1 mm de abertura', 'Medias registradas - 0.7 mm de
36           abertura', 'Medias registradas - 0.4 mm de abertura']
37 for i in range(3):
38     ax = fig.add_subplot(gs[i, 1])
39     im = ax.imshow(matrices[i], cmap=colormap, norm=plt.Normalize(vmin=vmin, vmax=
40           vmax), interpolation='nearest')
41     ax.set_xticks(np.arange(5))
42     ax.set_yticks(np.arange(5))
43     ax.set_xticklabels(np.arange(1, 6))
44     ax.set_yticklabels(np.arange(5, 0, -1))
45     ax.set_title(titulos[i])
46
47 cbar_ax = fig.add_subplot(gs[:, 0])
48 fig.colorbar(im, cax=cbar_ax, label='Medias')
49
50 ax_img = fig.add_subplot(gs[:, 2])
51 ax_img.imshow(img_comparativa)
52 ax_img.axis('off')
53 ax_img.set_title('SiPM SenseL Serie C')
54
55 plt.tight_layout()
56 plt.savefig("imagen_completa.png", dpi=300)
57 plt.show()

```