



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Facultad de Ciencias

LABORATORIO EXPERIMENTAL DE
FÍSICA DE PARTÍCULAS

**SET-UP PARA LAS MEDIDAS
DE EFICIENCIA DE FOTODETECCIÓN.**

Autor:
Elena Jiménez García

Índice

1	Introducción a los SiPM	3
2	¿Qué es el PDE (photon detection efficiency)?	4
3	Montaje experimental	7
3.1	Componentes	7
3.1.1	Fuentes de luz	7
3.1.2	Esfera de integración	7
3.1.3	Fotodiodo	8
3.1.4	SiPM en estudio	10
3.1.5	Fuentes de alimentación	12
3.1.6	Electrómetro	12
3.1.7	Osciloscopio	13
3.1.8	Generador de ondas	13
3.2	Montaje completo	14
4	Medidas a realizar	16
4.1	Medidas con luz	16
4.2	Medidas en condiciones de oscuridad	20
	Referencias	22

1 Introducción a los SiPM

Un fotomultiplicador de silicio (SiPM) es un detector de luz de estado sólido formado por una matriz de diodos conectados en paralelo a un sustrato común de silicio; cada uno de éstos cuenta con una resistencia de extinción encargada de parar el fenómeno de avalancha de carga. Dicha matriz se encuentra entre los tamaños de 1×1 y $6 \times 6 \text{ mm}^2$ (aunque el tamaño puede depender del fabricante) y consta de una alta densidad de fotodiodos de avalancha (SPAD single-photon avalanche diodes), aproximadamente 10^4 SPAD/mm^2 .

Esencialmente un SPAD es una unión PN diseñada para trabajar en corriente inversa por encima del voltaje de rotura. Este voltaje se alcanza cuando tanto electrones como huecos pueden ser acelerados y provocar lo que se conoce como una avalancha de carga.

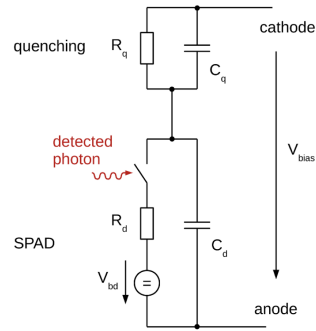


Figura 1: Esquema circuital de un SPAD estando integrada la resistencia de extinción. [1]

Dependiendo del voltaje aplicado a la unión, se dan tres regímenes de operación:

1. Régimen de fotodiodo: el voltaje aplicado es bajo y no existe una multiplicación adicional de pares electrón-hueco.
2. Régimen de avalancha: al incrementar el voltaje aplicado, se incrementa el campo eléctrico y los electrones ganan suficiente energía para, tras chocar con otros átomos de la red cristalina, generar pares electrón-hueco secundarios a través de ionización.
3. Modo Geiger: incrementando aún más el voltaje aplicado, tanto los electrones como los huecos ganan la energía suficiente como para ionizar nuevos pares e-h. Este es el régimen en el que trabajan los SPAD que conforman un SiPM. (Los huecos tardan más en ser acelerados dado que su masa efectiva es mayor a la de los e^-)

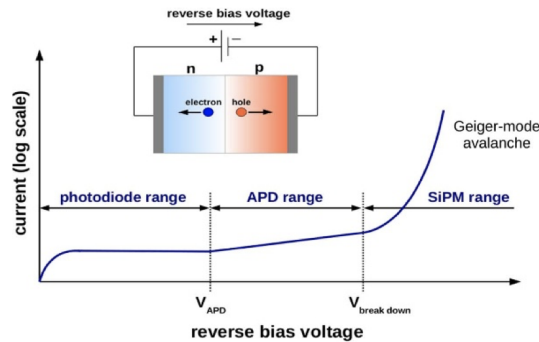


Figura 2: Régimenes de operación para un SPAD. [1]

Dado que los SiPMs son conjuntos de SPAD su funcionamiento es totalmente análogo a ellos. Detectada la luz se genera una avalancha de portadores de carga la cual provocará una señal lo suficientemente elevada como para poder ser detectada y medida, abriendo así la posibilidad de realizar una correcta caracterización de los sensores y medir las fuentes de luz en las que se está interesado.

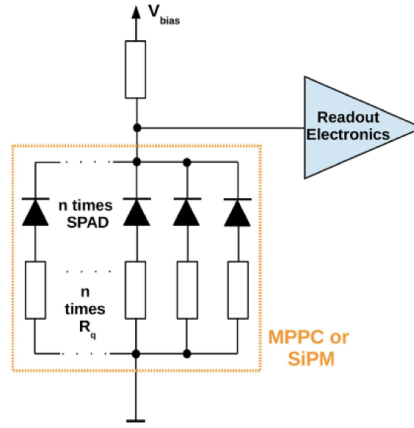


Figura 3: Esquema circuital para un SiPM donde se integran las resistencias de extinción. [1]

Los SiPMs son capaces de detectar y contabilizar fotones individualmente; además, cuentan con una eficiencia cuántica y homogeneidad de respuesta alta.

Los principales parámetros para la caracterización y modelado de los SiPMs son: voltaje de rotura y resistencia de extinción (características estáticas), ganancia, dark count rate (DCR), after-pulse y cross-talk (características dinámicas). Estos tres últimos parámetros hacen referencia al estudio del ruido, ya sea primario o correlacionado, de los SiPMs. En lo que respecta a las medidas de las características estáticas, los parámetros pueden ser obtenidos a través de las curvas de intensidad y voltaje (en adelante curvas IV).

Otros parámetros igual de importantes de estudiar son: eficiencia de fotodetección (PDE), factor de exceso de ruido (ENF) y tiempo de resolución de un fotón (SPTR). Concretamente, en este estudio se centrará la atención en el parámetro de eficiencia de fotodetección.

2 ¿Qué es el PDE (photon detection efficiency)?

La PDE cuantifica la capacidad de detección de un fotodetector. Esta característica se define como el ratio entre el número de fotones detectados y la cantidad de fotones que han llegado al detector. De forma general la PDE se define como [1]:

$$PDE(V_{over}, \lambda) = QE(\lambda) P_T(V_{over}, \lambda) FF_{eff} \quad (2.1)$$

Donde:

- QE : eficiencia cuántica.

- P_T : avalanche triggering probability.
- FF_{eff} : factor de llenado geométrico efectivo

La eficiencia cuántica (valor que suele expresarse en porcentaje) se puede definir cómo el ratio entre el número de pares e-h generados y el número total de fotones incidentes.

La probabilidad de avalancha indica la probabilidad de que uno de los portadores (electrones o huecos) que atraviese la región de alto campo eléctrico del semiconductor provoque una avalancha de carga. Dependiendo del portador se encuentran diferencias, pues es más eficiente recolectar electrones ya que la ionización de estos es mayor que la de los huecos.

Finalmente el factor de llenado se define como el área activa para todos los SPADs dividida entre el área total de los SiPM. Para celdas pequeñas ($10 \times 10 \mu m^2$ o menos) el FF se encuentra limitado al 30 %. En la actualidad, el mejor FF para celdas pequeñas es el ofrecido al usar resistencias de extinción de película de metal transparente. [1]

Cabe destacar que el FF no se incluye en la caracterización de un solo SPAD.

Para poder determinar experimentalmente este parámetro, será necesario tanto una referencia a través de la cual se pueda contabilizar la cantidad absoluta de fotones generados, como realizar un estudio de los fotones detectados por el sensor que se quiere caracterizar. Llevando esto a cabo, se puede adaptar la formulación teórica presentada en la ecuación 2.1 a los datos que se recogerán de forma experimental [2]:

$$PDE = n_{pe} R \frac{h\nu}{TP} \quad (2.2)$$

Donde:

- n_{pe} : número de fotoelectrones.
- T : periodo del pulso de luz.
- h : constante de Planck.
- ν : frecuencia de la luz.
- P : potencia óptica.
- R : cociente entre la potencia óptica detectada por el SiPM y la detectada por la referencia.

En la ecuación 2.2 se puede diferenciar la contribución de cada término, esto es, el número de fotoelectrones se encuentra asociado a la cantidad de fotones que ha detectado el SiPM en estudio, mientras que el término restante hace referencia al tipo y cantidad de luz que incide sobre la superficie del SiPM.

Existen en la ecuación 2.2 tres parámetros que requieren especial atención. El primero de ellos es el número de fotoelectrones. Este puede calcularse sabiendo que el número de fotones en un pulso de luz sigue una distribución de tipo Poissoniana. De esta forma se tiene que [2]:

$$P(0, n_{pe}) = e^{-n_{pe}} \Rightarrow n_{pe} = -\ln\left(\frac{N_{ped}}{N_{total}}\right) + \ln\left(\frac{N_{ped}^d}{N_{total}^d}\right) \quad (2.3)$$

Donde:

- $P(0, n_{pe})$: probabilidad de encontrar cero fotones.
- N_{ped} : número de eventos en los que se han detectado 0 fotones (condiciones de luz y oscuridad).
- N_{total} : número total de eventos detectados.

El hecho de trabajar con la probabilidad de encontrar cero fotones ofrece la posibilidad de obtener de forma directa la probabilidad de detección, simplemente teniendo en cuenta que esta probabilidad será $1 - P(0, n_{pe})$.

Además, con este procedimiento se descuentan de forma natural los efectos debidos al cross-talk y a los after-pulses. Estos efectos debidos al ruido se encuentran en los eventos que se han detectado en condiciones de oscuridad y como puede comprobarse, quedan sustraídos en la ecuación 2.3.

Es importante destacar que para que los valores de PDE no se encuentren sobreestimados se deben de eliminar estos efectos de ruido, en caso contrario, se estarían teniendo en cuenta eventos asociados a ruidos intrínsecos del SiPM.

El segundo parámetro que merece especial atención es la potencia óptica. Esta no es más que la cantidad de fotones que han sido generados por una fuente de luz. Este parámetro está asociado a la detección de luz del dispositivo utilizado como referencia. Generalmente los dispositivos de referencia son fotodiodos calibrados; estos poseen lo que se conoce como fotosensibilidad, propiedad que relaciona la corriente generada en el dispositivo debida a la detección de luz con la potencia de la misma, esto es, con el número de fotones. Por lo tanto, con una conversión sencilla, puede obtenerse la cantidad absoluta de luz:

$$S = \frac{I}{P} \quad (2.4)$$

Donde:

- S : fotosensibilidad (A/W).
- I : corriente (A).
- P : potencia (W).

Finalmente el último parámetro a tener en cuenta es el ratio entre las potencias ópticas. Este se obtiene como el cociente de la potencia óptica medida con el dispositivo de referencia en la posición donde se encontrará el sensor bajo caracterización y en la posición donde se encontrará usualmente el dispositivo de referencia. De esta forma se tienen en cuenta, por ejemplo, posibles factores geométricos en el caso de utilizar dispositivos auxiliares como diafragmas para focalizar la luz que llega al SiPM de estudio o filtros.

Lo importante de este parámetro es que no es absolutamente necesario, pues si el montaje permite deducir la potencia óptica en el punto donde se coloca el SiPM de estudio, R

puede ser omitido y la potencia óptica entre la que habría que dividir en la ecuación 2.2 sería la que está viendo el ya mencionado SiPM.

Así pues, habiendo sido presentado el parámetro de eficiencia de detección y quedando constancia de su importancia, se presentarán los componentes necesarios para la realización del montaje experimental que debe de llevarse a cabo para la caracterización de este parámetro.

3 Montaje experimental

3.1 Componentes

El montaje experimental requerido para la caracterización de la eficiencia de detección consta de:

Fuente de luz	Fuentes de alimentación
Esfera de integración	Electrómetro
Fotodiodo de referencia	Generador de ondas
SiPM en estudio	Osciloscopio

A continuación se comentarán brevemente las características principales de cada uno de los componentes mencionados:

3.1.1 Fuentes de luz

Se pueden utilizar distintos tipos de fuente como: LEDs, láser diodos o lámparas, como una lámpara de xenón. No obstante, la atención se centrará sobre el primer tipo de fuente.

Se deben de escoger tantos LED como longitudes de onda se quieran estudiar y estos deben de poder operar en un régimen de alta frecuencia en lo que respecta al tipo de pulso introducido. Además, deben de operar correctamente con pulsos de anchura corta. Se pueden realizar pruebas previas para conocer a qué longitud emiten los LEDs seleccionados en función del voltaje de operación, utilizando para ello un monocromador. Además, se puede estudiar la emisión de los mismo. Para más información se recomienda [3].

Concretamente, se trabajará con LEDs tipo ultrabright los cuales se adaptan muy bien al montaje y de los que el laboratorio cuenta con un conjunto variado. Una de las diferencias de los LED ultrabright es que a igualdad de condiciones de trabajo, soportan el paso de una corriente mayor que los LEDs usuales. Además, el tipo de bulbo y los materiales usados en el mismo pueden variar con respecto a los LEDs que se encuentran normalmente en el mercado.

3.1.2 Esfera de integración

Componente óptico que cuenta con una cavidad esférica usualmente recubierta con PTFE (teflón). Este material es capaz de difundir y despolarizar la luz; a través de múltiples reflexiones en las paredes de la esfera, la luz consigue distribuirse de forma homogénea y por ello en todos los puntos de la misma se debe de encontrar la misma cantidad de luz.

Generalmente las esferas de integración tienen un rango espectral de trabajo que va desde los 250nm a los 2500nm. Se debe de tener cuidado al trabajar con luz ultravioleta, ya que puede dañar las paredes de la esfera. Se deben de cuidar también las condiciones de trabajo pues la humedad puede deteriorar el interior de la esfera e inutilizarla.

Las esferas suelen contar con tres o cuatro puertos de entrada, siendo uno de ellos especialmente diseñado para la colocación del sensor de estudio. Este puerto especial es en general más pequeño que el resto.

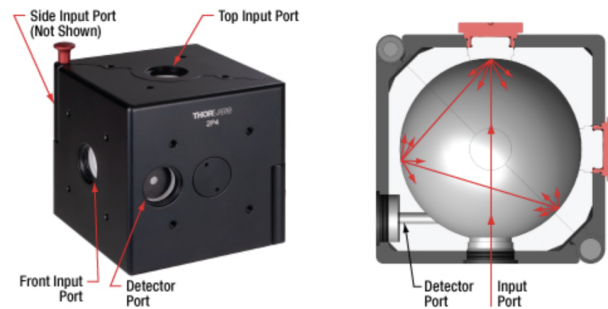


Figura 4: Esquema de una esfera integradora. [4]

Concretamente la esfera con la que se cuenta en el laboratorio es una esfera integradora de Thorlabs modelo IS200. Esta esfera ha sido descatalogada, sin embargo, se cuenta con información digitalizada en la base de datos del laboratorio.



Figura 5: Esfera integradora y accesorios con los que cuenta el laboratorio.

3.1.3 Fotodiodo

Se trata de un dispositivo semiconductor constituido por una unión PN sensible a la luz, principalmente a la visible e infrarroja. Los fotodiodos pueden operar en tres regímenes distintos según el tipo de polarización que se fije y según el voltaje aplicado. La polarización en estos dispositivos puede ser directa o inversa; en el caso de trabajar en polarización directa el fotodiodo operará como una célula solar, mientras que si se polariza de forma inversa se pueden encontrar dos regímenes de operación, uno de ellos en el que el voltaje de operación no supera el de rotura (régimen de fotodiodo) y otro superior al mismo (régimen de avalancha).

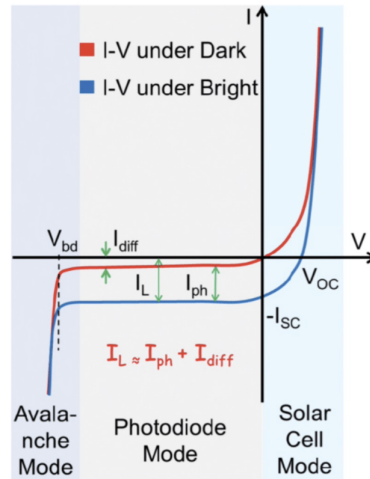


Figura 6: Curva IV y regímenes de operación para un fotodiodo.

Para este montaje experimental se requiere que el fotodiodo se encuentre polarizado de forma inversa y operando en el rango de voltaje en el que no se supere el de rotura. Esto se debe a que en este rango el fotodiodo responderá linealmente en función de la cantidad de luz recibida, en otras palabras, la corriente medida depende linealmente de la cantidad de luz. Destacar que el fotodiodo será utilizado como referencia para conocer la cantidad absoluta de luz generada por la fuente luminosa del sistema.

Como puede comprobarse en la figura 6, existe lo que se conoce como corriente oscura del fotodiodo. Esta corriente oscura es usualmente pequeña (puede oscilar entre 1-2 pA hasta los nA dependiendo del fotodiodo) y se debe a la generación aleatoria de electrones y huecos en un semiconductor que son arrastrados por el campo eléctrico. Esta corriente oscura posee una dependencia con la temperatura y con el voltaje de polarización; si aumenta la temperatura o el voltaje, aumentará la corriente oscura medida.

Destacar que cuanto menor sea la corriente oscura más fácil será deducir la corriente generada por la luz, pues la corriente luminosa será la composición de la corriente oscura y la fotodetectada. Para el estudio de la PDE la corriente que se debe de utilizar en los cálculos es la asociada a la fotodetectada, por lo tanto, se debe de conocer con precisión la corriente oscura del fotodiodo para poder descontarla de la corriente total correctamente.

Por otra parte, se debe de mencionar que la idoneidad de los fotodiodos como dispositivos de referencia se debe a la propiedad de fotosensibilidad, propiedad ya mencionada en apartados anteriores, concretamente su definición se da en la ecuación 2.4.

Es importante añadir que para este tipo de montaje es más adecuado trabajar con fotodiodos tipo PIN. Estos fotodiodos presentan un semiconductor intrínseco intercalado entre el semiconductor tipo P y N. Esta capa de semiconductor intrínseco permite aumentar la zona de depleción y con ello aumentar el campo eléctrico encargado de arrastrar los pares generados. De esta forma se puede aumentar la corriente generada por la incidencia de luz.

En el laboratorio se cuenta con un amplio abanico de fotodiodos; se han probado a lo largo de este estudio distintos fotodiodos, tanto de unión PN simple como aquellos que cuenta con un semiconductor intrínseco, concretamente se han probado:

- a) SM05PD1B (Fotodiodo PN - Thorlabs)
- b) S2281-01 (Fotodiodo PN - Hamamatsu)
- c) S1337-1010BQ (Fotodiodo PN - Hamamatsu)
- d) S3399 (Fotodiodo PIN - Hamamatsu)
- e) S5973-02 (Fotodiodo PIN - Hamamatsu)

A los datasheet de todos ellos se puede acceder a través de las páginas de cada fabricante, sin embargo, se dejan también en el repositorio del laboratorio. En la siguiente imagen se presentan por orden los fotodiodos mencionados:



Figura 7: Fotodiodos estudiados en laboratorio.

3.1.4 SiPM en estudio

Se han presentado de forma generalizada los fotomultiplicadores de silicio, pero aquí se estudiarán más detalladamente aquellos utilizados para el montaje experimental.

Concretamente los fotomultiplicadores que se estudiarán son aquellos que detectan luz en el rango visible, esto es, en el rango de los 300nm a los 900nm. Estos SiPM principalmente serán de FBK o Hamamatsu.

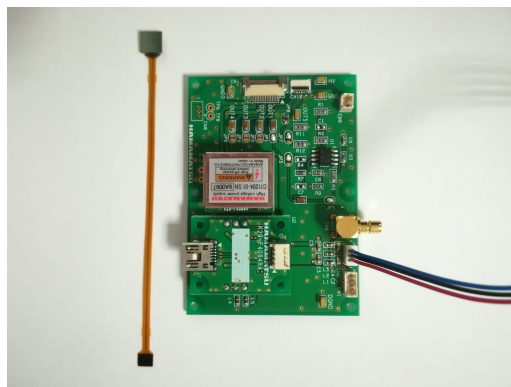


Figura 8: SiPM S13360-6050VE de Hamamatsu con el que se ha trabajado en el laboratorio y kit C12332-01 de alimentación/lectura.

Este SiPM posee un kit de alimentación y lectura también de Hamamatsu que trae incorporado un amplificador. Las conexiones están también ultimadas y es muy sencillo

conectarlo todo. Destacar que para la alimentación de los SiPM se debe de descargar la aplicación asociada al kit, pues a través de esta aplicación y una conexión USB se fija el voltaje de operación de los SiPM. Los detalles del kit (C12332-01) se pueden encontrar en la página web de Hamamatsu, pero se deja documentación detallada en el repositorio.

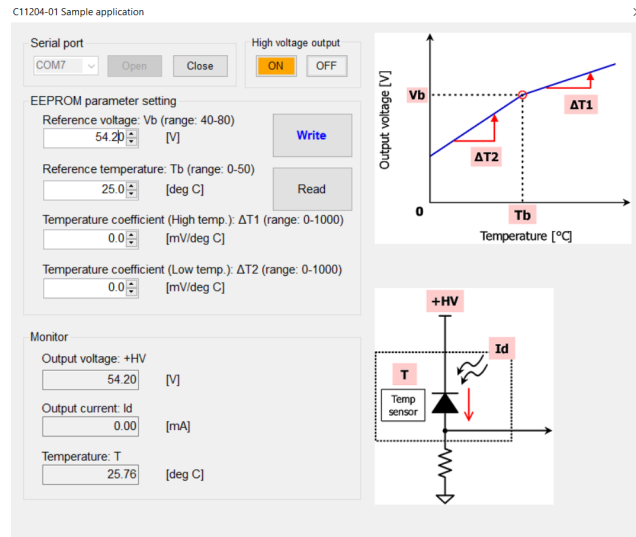


Figura 9: Display de la aplicación para fijar voltaje y temperatura de operación de los SiPM.

Es importante destacar que debido a la ganancia que presentan los SiPM la cantidad de luz con la que se debe de trabajar para que estos no saturen es demasiado baja para que los fotodiodos, los cuales tienen una ganancia de 1, puedan detectarla. Así pues, la corriente generada queda dentro de la corriente oscura del fotodiodo y se pierde la referencia luminosa.

Por esta razón es posible que deba de acoplarse al SiPM un filtro absorbente de densidad neutra. Estos se utilizan para aplacar la cantidad de luz que llega al detector; el porcentaje de luz transmitida dependerá de la longitud de onda y del filtro, pues estos pueden ser más o menos restrictivos según la aplicación para la que se usen. En el laboratorio se cuenta con un total de tres filtros, todos ellos de Thorlabs: NE510A (10 %), NE520A (1 %) y NE540A (0.01 %). Entre paréntesis se indica el porcentaje de transmisión a una longitud de onda de 633nm. [4]



Figura 10: Ejemplo de filtro de densidad neutra (NE510A).

El datasheet de los mismo puede ser encontrado en [4]. Sin embargo, se deja la documentación en el repositorio del laboratorio.

3.1.5 Fuentes de alimentación

Se requieren al menos dos fuentes de alimentación, una para el SiPM y otra para el fotodiodo de referencia. Dado que los valores de voltaje a los que se trabajará no son demasiado elevados, una fuente de alimentación tradicional será más que suficiente.

Durante el estudio se ha trabajado fundamentalmente con el SiPM S13360-6050VE y su circuito de lectura, por ello ha sido necesario que una de las fuentes tuviese dos canales. Por el tipo de conexiones del kit de lectura se requerían dos puertos en la fuente.

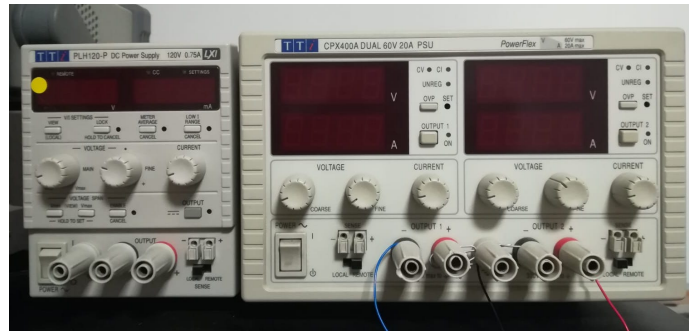


Figura 11: Fuentes de alimentación utilizadas. Fuente PLH120-P utilizada para la alimentación del fotodiodo; fuente CPX400A DUAL utilizada para la alimentación del SiPM.

3.1.6 Electrómetro

El electrómetro con el que se ha trabajado ha sido el modelo 6514 de Keithley. Este instrumento permite una medida precisa de la corriente, tanto en oscuridad como en condiciones de luz, de los fotodiodos con los que se ha trabajado. En lo que respecta a la resolución se pueden llegar a medir femtoamperios sin problemas. Para las tomas de datos realizadas se ha llegado a obtener un error de $\pm 1 \cdot 10^{-17} \text{ A}$ para valores de $9 \cdot 10^{-9} \text{ A}$. No obstante, aquí se indica la última cifra decimal; para calcular de forma más exacta el error habría que recurrir al manual del electrómetro.

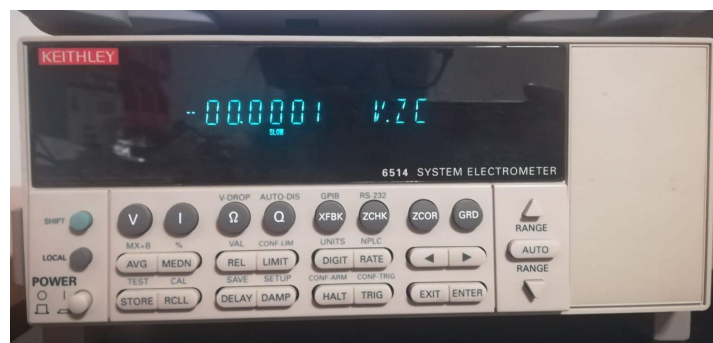


Figura 12: Electrómetro 6514 Keithley.

Destacar que los rangos de corriente con los que se ha trabajado son muy pequeños, estando en el orden de 1 pA en condiciones de oscuridad y superior a $70 - 80 \text{ pA}$ en condiciones de luz. Por lo tanto, se ha de ser muy cuidadoso a la hora de medir, pues cualquier

interferencia o ruido puede afectar negativamente a valores tan sensibles. Los rangos mostrados pueden oscilar dependiendo del fotodiodo, pero aquí se pretende dar una referencia del rango mínimo y máximo dentro del cual se ha trabajado.

3.1.7 Osciloscopio

El osciloscopio con el que se ha trabajado es el Rhode&Schwars RTA4004. Con este osciloscopio se han podido obtener de forma directa parte de los datos necesarios para el cálculo del PDE gracias a las distintas posibilidades que ofrece como por ejemplo, las opciones de matemática integradas de serie. También tiene un amplio espectro de configuración con el cual se ha podido trabajar cómodamente para la obtención de distintos ficheros en los cuales almacenar la señal recogida en un periodo de tiempo relativamente largo.

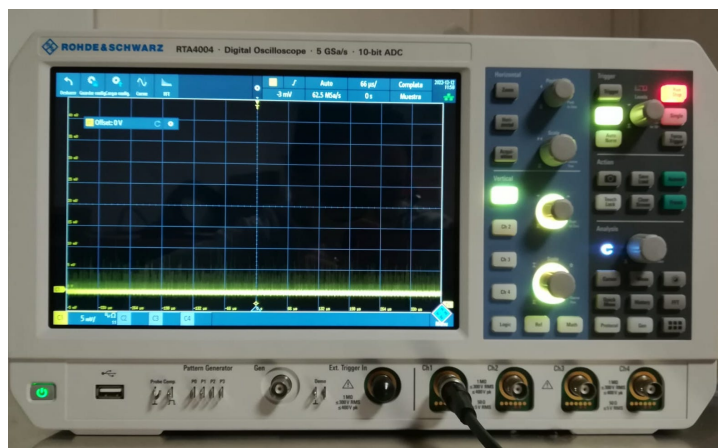


Figura 13: Osciloscopio Rhode&Schwars RTA4004.

3.1.8 Generador de ondas

El generador de ondas debe de ser capaz de operar en frecuencias de pulso altas y crear un pulso lo suficientemente corto para que los detectores trabajen en las condiciones óptimas. Concretamente el generador de ondas utilizado es el modelo SDG 2122X de Siglent.

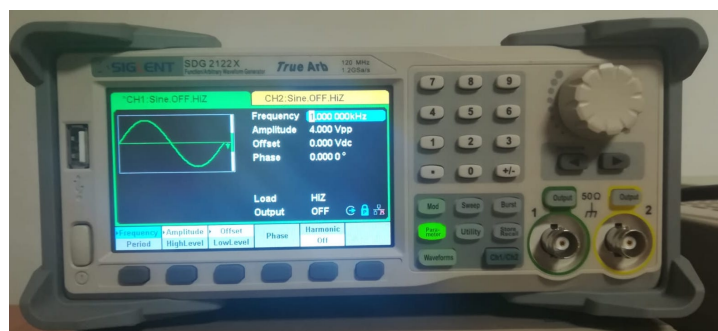


Figura 14: Generador de ondas SDG 2122X Siglent.

3.2 Montaje completo

Habiendo sido presentados los componentes necesarios para el montaje se muestra como deberían de colocarse los elementos para poder medir y tomar datos de forma adecuada.



Figura 15: Montaje completo.

Como puede comprobarse, los dispositivos se encuentran a un ángulo de 90° uno de otro, de esta forma se trata de evitar que cualquiera de los detectores, ya sea el SiPM en estudio o el fotodiodo de referencia, vean la fuente de luz (LED) de forma directa.

En lo que refiere a los fotodiodos con los que se ha trabajado, dos de ellos (SM05PD1B y el S2281-01) se encontraban preparados para poder ensamblarlos a la esfera de forma directa y tenían preparada la salida de alimentación/lectura directamente a una conexión BNC o a una conexión lemo. Sin embargo, el resto de fotodiodos necesitan de un sencillo montaje para adaptar las conexiones y el soporte. Para ello se utilizó una pequeña caja metálica a la que se le abrieron tres agujeros, dos de ellos para incorporar los adaptadores para las conexiones BNC de alimentación y de salida de la señal, y el tercer agujero se hizo para servir como soporte al fotodiodo y para poder ensamblar la caja metálica a la esfera integradora.

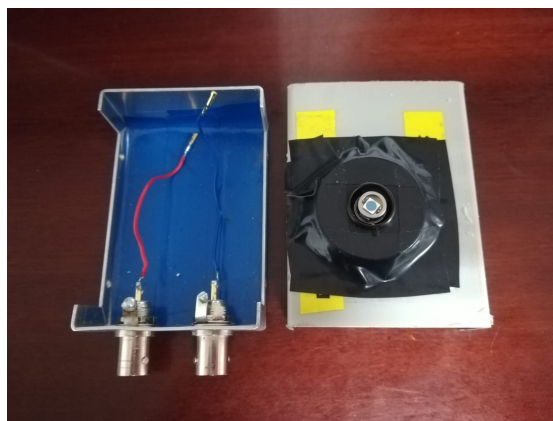


Figura 16: Caja para las conexiones y soporte. Se muestra en la imagen el fotodiodo S3399.

Como puede verse el interior de la caja contiene únicamente los cables de alimentación y de salida de la señal junto con adaptadores para introducir las patillas (ánodo y cátodo) del fotodiodo. Destacar que si el fotodiodo cuenta con una tercera patilla (tierra), ésta puede ser conectada a la propia caja metálica, por lo tanto pegando dicha pata a cualquier parte metálica de la caja se consigue la toma a tierra.

Por otra parte, se debe de destacar las conexiones realizadas para el LED. Como puede comprobarse se adaptó la conexión con un conector BNC y lemo para intentar eliminar posibles ruidos. Sin embargo, dado que cuenta con una resistencia (dentro del termorretractil amarillo) y un pequeño cable (dentro del termorretractil rojo) que se encuentran físicamente en paralelo, pueden hacer de antena e introducir ruidos en la señal de salida del SiPM o del fotodiodo. Para tratar de evitar esos posibles ruidos, se recomienda apantallar este tramo de conexión con papel de aluminio y apretarlo lo suficiente para que quede todo compacto y lo más cerrado posible.



Figura 17: Conexiones para el LED, sin apantallar y apantalladas.

Dado que se necesitará llevar a cabo medidas en condiciones de oscuridad, se debe de intentar conseguir unas condiciones óptimas para que la medida realizada pueda tener sentido físico. Por ello se introdujo el montaje anteriormente mostrado (figura 15) en un conjunto de cajas cubriendo las mismas con una tela opaca. Destacar que estas cajas se conectaron a tierra intentando que actuaran como caja de Faraday.

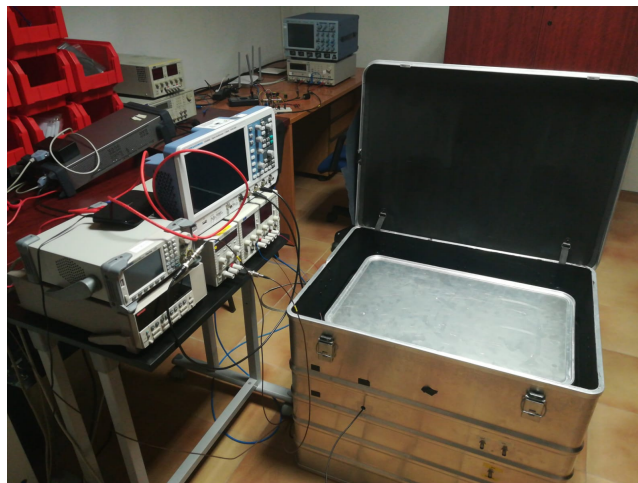


Figura 18: Conjunto de cajas dentro de las cuales se encuentra el montaje sensible, fuentes de alimentación, osciloscopio, electrómetro y generador de ondas.

4 Medidas a realizar

4.1 Medidas con luz

Las medidas que se deben de realizar en condiciones de luminosidad son dos, una referente a la detección de luz por parte del fotodiodo de referencia y otra a la detección del SiPM. Se comenzará estudiando la realización de las medidas asociadas al fotodiodo.

Primero se deben de realizar las conexiones necesarias para la correcta alimentación del fotodiodo y la lectura de la corriente generada por la luz. Se debe de conectar el fotodiodo a la fuente de alimentación que consta de un solo canal y también al electrómetro por la entrada triaxial que tiene en su parte posterior; será necesario utilizar el adaptador pertinente. Una vez hecho esto hemos de asegurarnos de que el funcionamiento es el correcto, para ello se deben de llevar a cabo medidas previas, concretamente se debe de estudiar la variación de la corriente oscura en función del voltaje aplicado y también la respuesta lineal que debe de tener el fotodiodo en función de la cantidad de luz.

Para medir la corriente con el electrómetro se deben de seguir una serie de pasos:

1. Pulsar SHIFT (morado) y tras ello DAMP (amarillo). Finalmente pulsar el botón ENTER.
2. Pulsar el botón ZCHK (azul). Con ello el instrumento determina el ruido de base que tendrá la medida.
3. Seleccionar el modo corriente (negro).
4. Ajustar el orden de magnitud en el que se va a trabajar con las flechas que se encuentran arriba y abajo de AUTO (marrón). Una vez ajustado seleccionar ENTER.
5. Pulsar ZCOR (rojo); con este paso se corrige el nivel de ruido base.
6. Finalmente pulsar AUTO (marrón).
7. Tras la configuración alimentar el fotodiodo.

En la siguiente figura se indican los botones implicados en la secuencia.

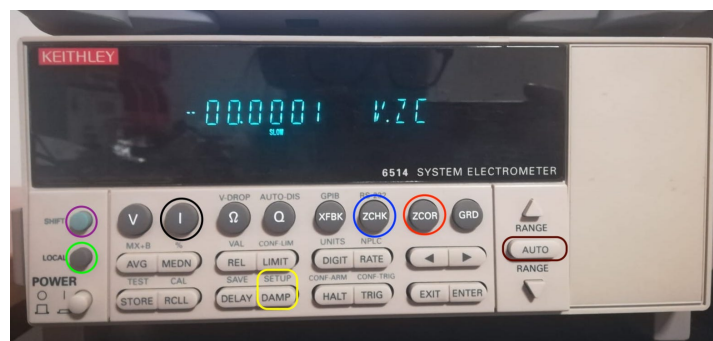


Figura 19: Esquema de la configuración del electrómetro para las medidas de corriente. Nota: El botón local (verde) sirve para volver al control manual tras realizar una medida remota.

Estos pasos se pueden seguir como comprobación de que se está leyendo correctamente la corriente. No obstante, se realizó un fichero en Python ('Photodiode.Electrometer.py') a través del cual el ordenador utilizado para la toma de datos se comunica de forma directa con el electrómetro, configurándolo como se ha indicado y recogiendo los datos inmediatamente. Destacar que si se va a ejecutar el programa de forma directa, el fotodiodo no debe de estar alimentado hasta que no se lance el programa y se ejecute la parte del mismo referente a la configuración del electrómetro. En caso contrario el instrumento estaría operando en una configuración inadecuada y podría llegar a estropearse.

De esta forma se pueden realizar distintas medidas de corriente oscura en función del voltaje para comprobar que el funcionamiento del fotodiodo sea el correcto. Además, esta prueba ofrece una idea del orden de magnitud de la corriente oscura, así como una muestra de la estabilidad o inestabilidad de la medida.

Por otra parte, se debe de comprobar que la respuesta lineal ante un estímulo de luz es la esperada. Para ello se debe de fijar el voltaje de operación del fotodiodo e incrementar paulatinamente la cantidad de luz emitida por el LED (o la fuente de luz con la que se trabaje). La toma de datos de corriente será idéntica a la explicada anteriormente.

Recordar que el fotodiodo debe de ser polarizado de forma inversa, siempre dentro de los márgenes de operación del mismo y sin sobrepasar el voltaje máximo de operación, teniendo muy en cuenta la máxima corriente que puede pasar por él (esto último cobra especial importancia si por alguna razón se debe de polarizar en directa).

Realizadas estas medidas de comprobación y habiendo sido correctas en función de los datos que da el fabricante, se pueden realizar con seguridad las medidas para la obtención del PDE.

Para las medidas referentes al SiPM deben de realizarse las conexiones para la alimentación y fijar el voltaje de operación. La alimentación del SiPM se realiza a través del kit C12332-01; de la board que lo conforma salen tres cables (azul, negro y rojo) que se deben de conectar a los puertos de la fuente de alimentación (utilizar una fuente de alimentación con dos canales). El cable azul debe ir al polo negativo, el rojo al positivo y el negro debe de estar conectado a tierra.

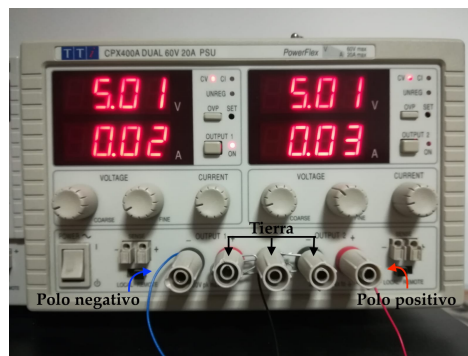


Figura 20: Conexiones para la alimentación del SiPM.

Como puede comprobarse los puertos que hacen de toma a tierra se encuentran puenteados. Esto es necesario para que la alimentación sea la adecuada. Destacar que en ambos canales se debe de fijar un voltaje de 5V, siendo este el recomendado por Hamamatsu.

En lo que respecta a la fijación del voltaje de operación de los SiPM se debe de realizar a través de la aplicación asociada al kit. El voltaje se fija a través de la conexión USB que incorpora la board de lectura y alimentación. Esta aplicación permite fijar la temperatura de operación, la cual debe de ser fijada en función de la temperatura ambiente; esto ayuda a realizar pequeñas correcciones en el voltaje. Un display de la aplicación se puede ver en la figura 9.

Las medidas asociadas al SiPM se realizarán con el osciloscopio, el cual recoge la señal de salida del sensor. Se deberá realizar la integral de carga a la respuesta que ofrece el SiPM al pulso de luz. Esta integral de carga puede ser realizada de forma directa con el osciloscopio, por lo tanto, los datos recogidos son directamente los necesarios para el análisis.

Dado que se necesita trabajar con una fuente de luz operando con pulsos cuadrados será necesario configurar el generador de ondas. Se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Pulsar 'Waveforms' (rojo) y seleccionar el pulso cuadrado con los botones naranjas.
2. En la pantalla táctil (recuadrada en blanco) seleccionar "Frequency" y ajustar a 33kHz (puede ajustarse con el teclado señalado en lila o con la ruleta señalada en verde).
3. Repetir el paso 2 para la amplitud y el ancho del pulso (ajustar según convenga para que tanto fotodiodo como SiPM trabajen cómodamente).
4. Pulsar el 'Output' (amarillo) del canal donde se trabaje.

En la siguiente figura se indican los botones implicados en la secuencia.

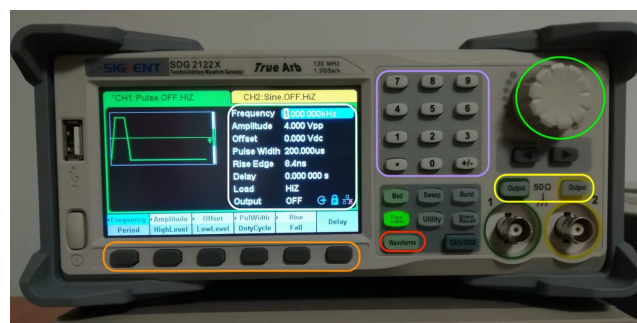


Figura 21: Esquema de la configuración del generador de ondas para un pulso de luz cuadrado.

En lo que respecta a la configuración del osciloscopio, los pasos básicos a seguir son:

1. Conectar a uno de los canales del osciloscopio el cable que guía la señal de salida desde el kit de lectura del SiPM (entradas señaladas en rojo).
2. Comprobar que la señal obtenida es correcta a través de la visualización en el osciloscopio de las cuentas oscuras del sensor.
3. Conectar a otro de los canales del osciloscopio una salida directa del generador de ondas para visualizar el pulso de luz que se introducirá al LED (utilizar una T para enviar el pulso al LED y al osciloscopio al mismo tiempo).

4. Activar el LED y observar la respuesta del SiPM. Para visualizar al mismo tiempo y de forma estática la respuesta del SiPM se debe de hacer trigger en el canal donde se introduzca el pulso de luz. Ajustar el zoom para ver cómodamente la respuesta del SiPM. Para ajustar el trigger se realiza con los botones del recuadro naranja. La posición del trigger se controla con la ruleta. Se puede parar la imagen con el botón "Run/Stop" y se puede hacer una captura de un suceso concreto (o varios) con "Single". El zoom horizontal se ajusta con las ruletas del cuadro verde y el vertical con las del cuadro rosa. Para la escala vertical debe de seleccionarse el canal que posee la señal.
5. Seleccionar el canal donde está la señal del SiPM. Activar la aplicación de matemática (esquina inferior derecha del cuadro rosa) y seleccionar la operación 'integral'.



Figura 22: Display de la opción matemática del osciloscopio.

6. Seleccionar el intervalo de integración (con los cursores mostrados en la figura 24), el cual debe de contener al pulso completo de respuesta del sensor.
7. Se puede lanzar el programa en Python 'Spectrum_DAQ.py' para la adquisición de datos.

En la siguiente figura se indican los botones implicados en la secuencia.

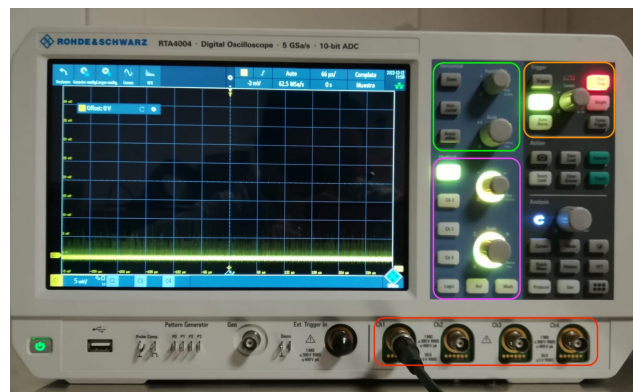


Figura 23: Esquema de la configuración del osciloscopio para las medidas en condiciones de luz.

Si todo se ha configurado de forma correcta, la imagen que debe de obtenerse en el osciloscopio es la mostrada a continuación:

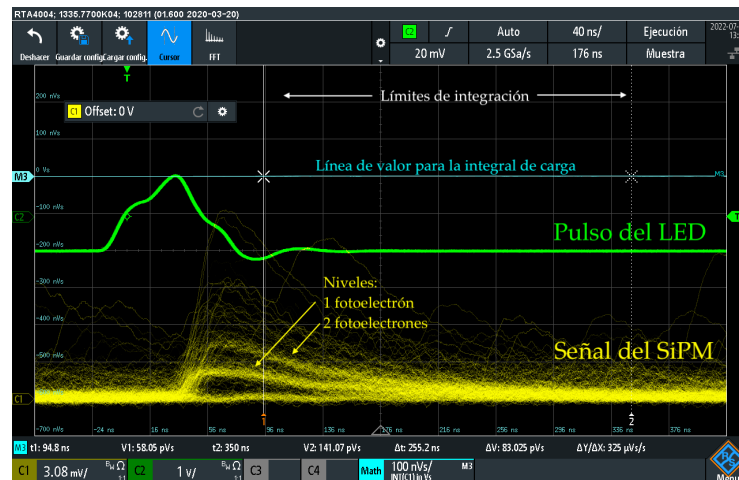


Figura 24: Respuesta del SiPM S13360-6050VE ante un pulso de luz tras la configuración del osciloscopio.

Es importante mencionar que aunque el pulso de luz original es cuadrado, este se verá deformado debido a la utilización de la T para enviar el pulso al LED y al osciloscopio al mismo tiempo; además, al necesitar un pulso muy corto también se desvirtúa la forma del mismo. Sin embargo, a pesar de todo ello, se puede comprobar que la respuesta del SiPM es la adecuada.

Tras la comprobación del correcto funcionamiento del fotodiodo y del SiPM, debe de ajustarse (principalmente a través de la amplitud y la anchura) el pulso de luz para que ambos dispositivos puedan operar de forma cómoda. En el caso de que la cantidad de luz no pueda adaptarse a ambos, se puede acoplar al SiPM un filtro de densidad neutral. De esta forma puede aumentarse la cantidad de luz para que la corriente luminosa medida con el fotodiodo sea lo suficientemente amplia para obtener una fotocorriente significativa con respecto a la corriente oscura y el SiPM no saturé.

Habiendo ajustado la cantidad de luz y operando ambos dispositivos en los rangos adecuados para la obtención de resultados significativos, se debe de realizar una medida simultánea, es decir, se deben de adquirir los datos de corriente del fotodiodo y los datos asociados a la integral de carga del SiPM al mismo tiempo. Para ello se lanzarán de forma conjunta los programas escritos en Python asociados a las medidas de corriente ('Photodiode.Electrometer.py') y a la integral de carga ('Spectrum.DAQ.py'); esto se realizará a través del programa 'Paralelo.py'.

4.2 Medidas en condiciones de oscuridad

En este caso solo será necesario trabajar con el osciloscopio y el SiPM en estudio. Lo primero de lo que hay que asegurarse es que las cuentas oscuras del SiPM se ven correctamente en el osciloscopio (recordar los primeros pasos en la configuración para las medidas en condiciones de luz). Tras ello, la secuencia de pasos que hay que seguir para la configuración de esta medida es la siguiente:

1. Tras comprobar que se observan adecuadamente las cuentas oscuras, en las opciones desplegables del canal correspondiente, se debe de ajustar la ventana temporal de trabajo. Para ello en la opción 'Horizontal' se ajusta la 'Escala de tiempo' a $66\mu s$.
2. En la opción 'Adquisición' se ajusta la resolución a 50KSa y el número de capturas a 10 (este es un número adecuado para tener una muestra de datos significativa).
3. Ajustar el trigger en un valor negativo (por ejemplo $-3mV$) y seleccionar AUTO

Si todo se ha configurado correctamente, los parámetros que a continuación se indican deberían de tener los siguientes valores:

- Trigger: -3 mV
- Tiempo: $66\mu s$
- Resolución: 62.5MSa/s

Estos parámetros pueden comprobarse en la propia ventana del osciloscopio:

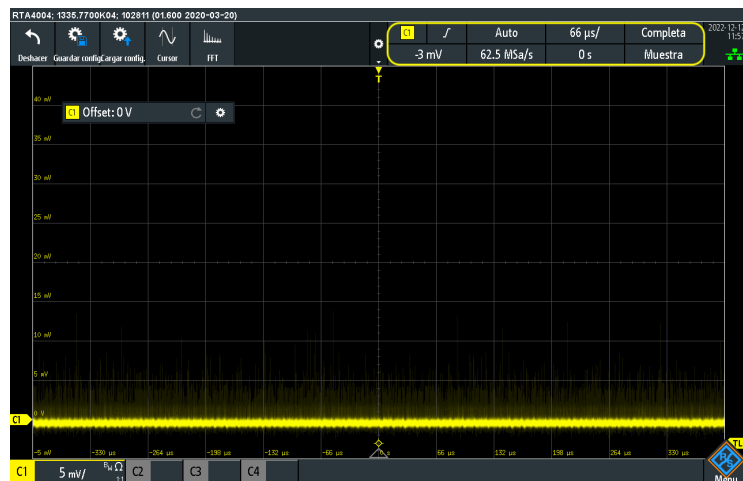


Figura 25: Captura de pantalla del osciloscopio en la que se muestra la señal del SiPM S13360-6050VE en condiciones de oscuridad tras realizar la configuración para la medida. En el cuadro amarillo se muestran los parámetros básicos de la configuración.

Tras la configuración del osciloscopio deben de tomarse las 10 capturas, éstas se toman con el botón "Single". Realizadas las capturas se lanza el programa Waveform_DAQ.py para traspasar los datos de señal recogidos con el osciloscopio.

Referencias

- [1] Stefan Gundacker and Arjan Hearing 2020 The silicon photomultiplier: fundamentals and application of a modern solid-state photon detector *Phys. Med. Biol.* 65 17TR01
- [2] P.Eckert, et al., Characterisation studies of silicon photomultipliers, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 620 (2010) 217-226.
- [3] Zappalà, Gaetano, et al. Set-up and methods for SiPM Photo-Detection Efficiency measurements. *Journal of Instrumentation*, 2016, vol. 11, no 08, p. P08014.
- [4] <https://www.thorlabs.com>