

Práctica 1

Instrumentación y fotodetección básica

Objetivos

- Conocer la instrumentación del laboratorio y las fuentes de luz a emplear en las prácticas.
- Observar y comparar las fotoseñales de un tubo fotomultiplicador (PMT) y de un fotomultiplicador de estado sólido.

Material

- Osciloscopio digital Agilent Infiniium DSO81204B, 12 GHz, 40 GSa/s.
- Osciloscopio Tektronix TDS3052, 500 MHz, 5 GSa/s.
- Generador de funciones Tektronix AFG3252, 240 MHz, 2 GSa/s.
- Fuente de alimentación de alta precisión Keithley 6487.
- Fuente de alimentación HAMEG HMP2030.
- Analizador de redes Agilent E5061B, 5 Hz - 3 GHz.
- Analizador de redes Hewlett Packard 8720C, 50 MHz - 20 GHz.
- Analizador de espectros y ruido Agilent E4402B, 9 kHz - 3 GHz.
- Generador de pulsos en rango del sub-nanosegundo.
- Fotoemisores LED.
- Tubo fotomultiplicador Hamamatsu modelo R10408.
- SiPM Hamamatsu modelo S10362-33-050C.
- Caja de aislamiento luminoso.

Procedimiento

- Comenzaremos con una descripción de la instrumentación que necesitaremos para el trabajo experimental con fotodetectores y electrónica de alta frecuencia. Aprenderemos a manejar los instrumentos mediante ejemplos prácticos.

- A continuación realizaremos el montaje necesario para un experimento básico de fotodetección (incluyendo una cadena de amplificación). Como fotodetectores emplearemos un PMT y un SiPM. Iluminaremos débilmente el fotodetector mediante una fuente LED y registraremos la fotoseñal correspondiente. Observaremos cómo cambia la fotoseñal al variar la ganancia del fotodetector. Obtendremos los patrones de conteo de fotones en ambos casos.
- Con toda la información obtenida, compararemos ambos fotodetectores. Por una parte, la forma de las fotoseñales permitirá comprobar que el PMT admite una mayor frecuencia de repetición óptica que el SiPM. Por otra parte, el patrón SPC revelará la mayor sensibilidad del SiPM para detección de ultra-alta sensibilidad.

Práctica 2

Características del SiPM y obtención del patrón SPC

Objetivos

- Profundizar en el manejo práctico del fotomultiplicador de estado sólido.
- Observar fenómenos característicos del SiPM.
- Obtener patrones SPC para distintas condiciones de funcionamiento y observar, interpretar y caracterizar su variación.
- Comprobar el funcionamiento de un módulo SiPM integrado de Hamamatsu y compararlo con los SiPMs utilizados con anterioridad.

Material

- Osciloscopio digital Agilent Infiniium DSO81204B, 12 GHz, 40 GSa/s.
- Generador de funciones Tektronix AFG3252, 240 MHz, 2 GSa/s.
- Fuente de alimentación HAMEG HMP2030.
- Fotoemisores LED.
- SiPM Hamamatsu modelo S10362-33-050C.
- SiPM Hamamatsu modelo S10362-11-050C.
- MPPC module C10751-02 de Hamamatsu.

Procedimiento

- Determinaremos el rango lineal de un SiPM. Lo haremos para voltaje de polarización variable ante iluminación constante y para iluminación variable ante voltaje de polarización constante. Observaremos con claridad el fenómeno de saturación.

- Obtendremos los patrones de conteo de fotones para dos modelos de SiPM, uno de área grande ($3 \times 3 \text{ mm}^2$) y otro de área pequeña ($1 \times 1 \text{ mm}^2$). Revisaremos las figuras de mérito propuestas para la caracterización de los patrones SPC. Comprobaremos que estos parámetros ofrecen resultados considerablemente mejores en el caso del SiPM de área pequeña.
- Observaremos cómo varía el patrón SPC ante niveles de iluminación y de polarización variables. Interpretaremos las observaciones relacionándolas con lo aprendido en la teoría.
- Pondremos en funcionamiento el módulo SiPM integrado de Hamamatsu. Observaremos la fotoseñal típica, obtendremos su patrón SPC y compararemos con los SiPMs utilizados anteriormente.

Práctica 3

Fabricación y caracterización de un circuito en tecnología de montaje superficial

Objetivos

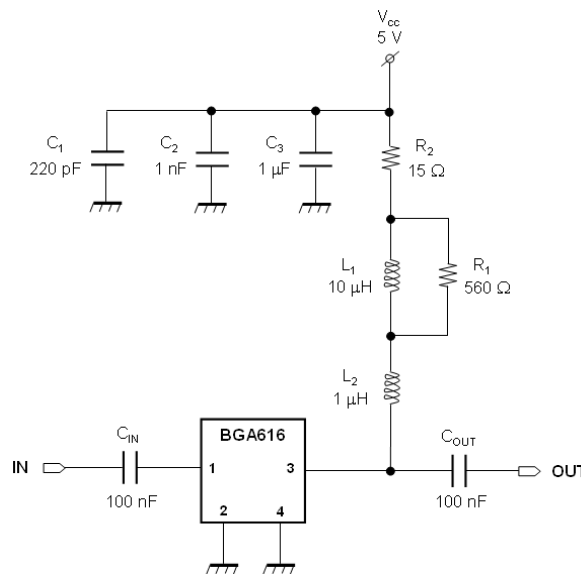
- Conocer el proceso de fabricación de un circuito mediante tecnología de montaje superficial.
- Caracterizar adecuadamente el circuito fabricado.

Material

- Placa fotosensible.
- Insoladora.
- Revelador.
- Líquidos para la fabricación de ácido (ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno).
- Acetona para la limpieza de placas.
- Taladro y brocas de diámetro < 1 mm.
- Componentes electrónicos de montaje superficial.
- Conectores SMA para soldadura en placa.
- Estación de soldadura.
- Fuente de ruido Agilent 346A, 10 MHz - 18 GHz.
- Analizador de redes Agilent E5061B, 5 Hz - 3 GHz.
- Analizador de redes Hewlett Packard 8720C, 50 MHz - 20 GHz.
- Analizador de espectros y ruido Agilent E4402B, 9 kHz - 3 GHz.
- Osciloscopio digital Agilent Infiniium DSO81204B, 12 GHz, 40 GSa/s.
- Generador de funciones Tektronix AFG3252, 240 MHz, 2 GSa/s.
- Fuente de alimentación HAMEG HMP2030.

Procedimiento

- A lo largo de esta práctica implementaremos y caracterizaremos el circuito amplificador mostrado en la figura. Este montaje (basado en el chip BGA616) está descrito en los apuntes del curso.



BGA616 amplifier bias network

- Partiremos de un diseño físico de la placa (*layout*) ya disponible en el laboratorio. Por una cuestión de tiempo **no** entraremos en cómo diseñar la placa con un software específico como Altium.
- En el laboratorio de proyectos procederemos a la insolación de la placa y a su revelado y atacado. Cuando tengamos una placa cuyo trazado de pistas sea satisfactorio, limpiaremos los restos de resina con acetona y practicaremos los taladros que sean necesarios.
- En el laboratorio de microondas realizaremos la soldadura de todos los componentes y conectores que componen el circuito.
- Una vez tengamos el circuito totalmente implementado procederemos a verificar su funcionamiento y a caracterizarlo. Lo primero que haremos será polarizar el amplificador con 5 V y comprobar que el nivel de corriente requerido está en torno a 50 - 60 mA. Atacaremos el amplificador con una

señal en forma de tren de pulsos rectangulares con las siguientes características: amplitud: 50 mV, frecuencia: 1 MHz, ancho de pulso: 4 ns. Observaremos la señal de salida y determinaremos si el factor de ganancia obtenido es aproximadamente el esperado. Si el circuito no funciona adecuadamente, lo revisaremos sistemáticamente, detectaremos las fallas y las solventaremos.

- Cuando el circuito funcione correctamente pasaremos a caracterizarlo. Haremos las siguientes medidas:
 - **Parámetros S.** Determinaremos los parámetros S del amplificador con ambos analizadores de redes. Los parámetros S_{11} y S_{22} nos informan acerca de las reflexiones que provoca el circuito en la entrada y en la salida respectivamente. Interesa que sean lo más bajos posibles (como los analizadores dan la información en unidades logarítmicas, interesa que sean parámetros muy negativos). El parámetro S_{21} informa acerca de la ganancia del amplificador. Tiene que ser una cantidad positiva. Compararemos la variación del parámetro S_{21} en función de la frecuencia con la información correspondiente que ofrece el fabricante del chip BGA616.
 - **Figura de ruido.** La figura de ruido de una etapa es el cociente entre la relación señal a ruido presente en la entrada de la etapa y la relación señal a ruido en la salida de la misma.

$$F = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}}$$

La figura de ruido mide la degradación que dicha etapa impone en la relación señal a ruido. Una etapa ideal (i.e. no ruidosa) no degradaría en absoluto la SNR, de modo que $SNR_{input} = SNR_{output}$ y $F = 1$ (medido en unidades naturales). En un caso real, la etapa añade ruido y degrada la SNR, esto es, $SNR_{input} > SNR_{output}$, de modo que $F < 1$. Para medir la figura de ruido de nuestro amplificador emplearemos la fuente de ruido Agilent 346A y el analizador de espectros y ruido Agilent E4402B. La medida tiene dos partes:

(1) Conexión de la fuente de ruido al analizador y calibración del mismo. La fuente de ruido ofrece niveles de ruido conocidos a frecuencias conocidas. Utilizaremos como rango de frecuencia: 10 MHz - 3 GHz.

(2) Conexión de la fuente de ruido a la entrada del amplificador y conexión de la salida del amplificador al analizador. Los nuevos niveles de ruido medidos en el analizador permiten conocer qué cantidad de ruido está añadiendo nuestro amplificador para cada frecuencia considerada.

Compararemos nuestros resultados con la información proporcionada por el fabricante del chip BGA616.

- **Rango dinámico.** Determinaremos hasta qué amplitud de la señal de entrada obtenemos una respuesta proporcional en la salida del amplificador. Esto es, obtendremos el rango de linealidad del circuito. Utilizaremos una señal de entrada en forma de tren de pulsos rectangulares (ancho: 4 ns, frecuencia: 1 MHz) con amplitud variable entre 0 V y 0.5 V (seleccionaremos al menos 10 puntos de medida equiespaciados en este rango). Para cada amplitud de entrada registraremos la amplitud de salida correspondiente. Determinaremos empíricamente a partir de qué amplitud de entrada comienzan a darse efectos de distorsión evidentes en la señal de salida. Representaremos gráficamente la amplitud de la señal de salida en función de la amplitud de la señal de entrada y determinaremos el rango de linealidad. En base a la pendiente de la región lineal obtendremos la ganancia que ofrece el amplificador para los pulsos que estamos usando y compararemos con el parámetro S_{21} obtenido anteriormente.

Práctica 4

Efecto del acortamiento del fotopulso y de la temperatura en el patrón SPC de un SiPM

Objetivos

- Comprobar el efecto de un esquema de acortamiento del pulso de fotodetección en el patrón SPC de un SiPM.
- Observar el efecto de la temperatura en el patrón SPC de un SiPM, con y sin esquema de acortamiento.

Material

- Osciloscopio digital Agilent Infiniium DSO81204B, 12 GHz, 40 GSa/s.
- Generador de funciones Tektronix AFG3252, 240 MHz, 2 GSa/s.
- Fuente de alimentación HAMEG HMP2030.
- Fotoemisores LED.
- SiPM Hamamatsu modelo S10362-33-050C.
- SiPM Hamamatsu modelo S10362-11-050C.
- Incubadora MRC Lab. BOD-150, -10 °C ... 70 °C.

Procedimiento

- Montaremos un esquema de acortamiento del pulso de fotodetección. Comprobaremos el efecto que tiene, para dos modelos de SiPM (uno de área ancha y otro de área pequeña), tanto en la forma de la fotoseñal como en el patrón SPC.
- Observaremos cómo varía el patrón SPC ante iluminación y voltaje de polarización variable y ante distintas longitudes del acortador.

- Compararemos los patrones SPC obtenidos, sin acortador, a 25 °C y a 0 °C ante un voltaje de polarización fijo e interpretaremos los resultados. Aplicaremos corrección del voltaje de polarización de acuerdo con la variación de temperatura aplicada. Comprobaremos que el uso combinado de refrigeración y corrección de voltaje de polarización mejora el patrón SPC.
- Utilizaremos el esquema acortador en un SiPM de área grande a 25 °C y a 0 °C. Aplicaremos corrección de voltaje de polarización en correspondencia con la temperatura establecida. Observaremos el efecto de la refrigeración cuando se emplea acortamiento e interpretaremos el resultado.

Práctica 5

Algunas medidas de caracterización de un SiPM

NOTA. Esta práctica se hará completa o solo en parte, dependiendo de cómo vayamos de tiempo y de si fuera necesario o no añadir otra actividad a la evaluación continua. En cualquier caso, la práctica será desarrollada conjuntamente por todos los alumnos.

Objetivos

- Desarrollar programas para obtener información de caracterización relevante de un SiPM.
- Aplicar dichos programas a medidas pre-registradas y verificar que los resultados que proporcionan son coherentes con las previsiones.

Material

- Software de análisis y simulación Matlab.
- Medidas de caracterización pre-registradas. Una **medida** consiste en un grupo de **N** fotoseñales, cada una de ellas almacenada en un fichero ASCII. Cada fichero contiene una fotoseñal proporcionada por el SiPM bajo ciertas condiciones (voltaje de polarización, temperatura, excitación, etc.). Es por ello que a estos ficheros también los llamaremos **cuentas**. La señal se almacena en un formato de dos columnas, separadas por un caracter coma. La primera columna establece instantes de tiempo (unidades: segundos) y la segunda columna define los correspondientes niveles de voltaje (unidades: voltios). A continuación se muestra un ejemplo:

```
6.07321E-09,-4.3E-02  
6.09821E-09,-4.1E-02  
6.12321E-09,-3.9E-02  
6.14821E-09,-3.7E-02  
6.17321E-09,-3.4E-02  
6.19821E-09,-3.2E-02
```

El nombre de los ficheros está normalizado: **waveformXYZ.csv**, donde **XYZ** puede ir desde 001 hasta 999. Un conjunto de 999 **cuentas** forma lo que llamaremos un **train** (tren de cuentas) y se almacena en un directorio dedicado. El nombre de los directorios también está normalizado: **trainX**, donde **X** vale 1, 2, 3, ... Esta organización está motivada por la forma en que el osciloscopio Agilent Infiniium DSO81204B facilita el almacenamiento de señales.

Suponga que el canal 1 del generador de funciones Tektronix AFG3252 se utiliza para excitar la fuente LED con la que se ilumina el SiPM. Sincronizando ambos canales del generador, el canal 2 puede actuar como señal de trigger para el osciloscopio. Este osciloscopio permite almacenar en un fichero de texto la señal registrada cada vez que llega un evento de trigger. El equipo se encarga de actualizar el nombre del fichero añadiendo un sufijo numérico, desde 001 hasta 999. El nombre base del fichero lo establece el usuario (en nuestro caso se eligió el prefijo **waveform**). Ahora bien, el equipo impone un límite de 999 capturas. Normalmente necesitaremos más cuentas para hacer estimaciones relativamente precisas del patrón SPC, que será la base para muchos cálculos. Agrupando conjuntos de 999 cuentas en trenes podemos capturar tantas cuentas como deseemos. Supongamos que queremos capturar 5000 cuentas. Inicialmente indicamos al osciloscopio que almacene cuentas con el nombre **waveformXYZ.csv** en el directorio **train1**. De forma automática el osciloscopio salvará a fichero la señal que esté siendo registrada en el instante en que llegue el trigger. Como se comprende fácilmente, si el SiPM está siendo iluminado con un haz débil, este conjunto de señales grabadas en ficheros permitirá obtener el patrón SPC. ¿Cómo? Leyendo cada fichero, obteniendo la amplitud de pico o la carga para la señal que almacena e histogramando todos los resultados. Cuando el osciloscopio ha grabado 999 ficheros, finaliza el proceso. Es el momento en que nosotros debemos indicar que se repita el proceso, pero esta vez almacenando los ficheros en el directorio **train2**. Si no lo hacemos así, el osciloscopio sobrescribe los ficheros guardados con anterioridad. Finalizado el segundo proceso, repetiríamos indicando que almacene en el directorio **train3**. Y así sucesivamente. Por tanto, una **medida** de 5000 cuentas estará formada por 5 directorios, **train1**, **train2**, **train3**, **train4** y **train5**, cada de los cuales contiene 999 ficheros con los mismos nombres, desde **waveform001.csv** hasta **waveform999.csv**. Esta organización facilita el tratamiento automatizado de los ficheros mediante programas Matlab.

Las **medidas** se proporcionarán en forma de ficheros ZIP que incorporan la estructura de directorios mencionada.

Procedimiento

- En esta práctica trataremos de estimar la variación de tres parámetros del SiPM en función del voltaje de polarización aplicado a una temperatura fija de 25 °C: la ganancia del SiPM, la eficiencia de fotodetección (PDE) y las cuentas de oscuridad.
- Se proporcionan las siguientes **medidas**:

[11-050C_25grados_71V_LUZ.zip](#)

[11-050C_25grados_71.3V_LUZ.zip](#)

[11-050C_25grados_71.6V_LUZ.zip](#)

[11-050C_25grados_71.9V_LUZ.zip](#)

[11-050C_25grados_71V_DARK.zip](#)

[11-050C_25grados_71.3V_DARK.zip](#)

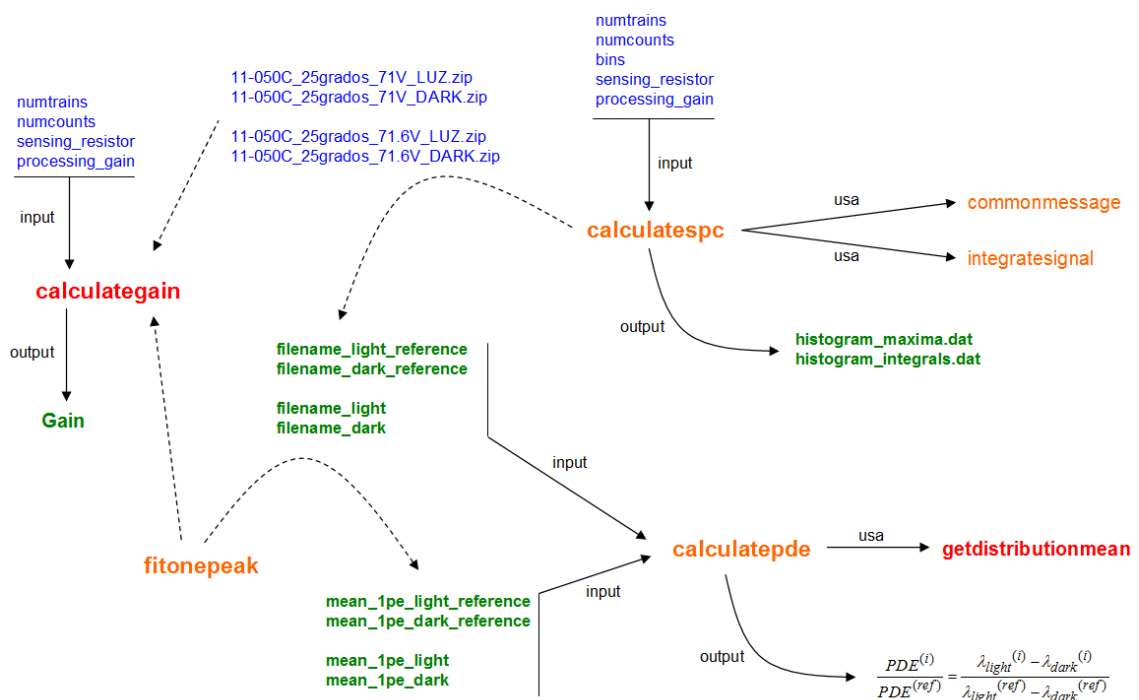
[11-050C_25grados_71.6V_DARK.zip](#)

[11-050C_25grados_71.9V_DARK.zip](#)

Cada **medida** incluye 5000 fotocuentas del SiPM de Hamamatsu S10362-11-050C, obtenidas a 25 °C, para distintos voltajes de polarización (71V, 71.3 V, 71.6 V y 71.9 V) y bajo condiciones de oscuridad (sufijo DARK) o bajo iluminación débil (LUZ).

- Se proporciona una arquitectura de programas Matlab para la obtención de los parámetros mencionados. Las tareas principales en esta práctica son:
 - (1) Entender dicha arquitectura. Esto incluye comprender cómo la combinación de programas y funciones proporcionados permite obtener los parámetros buscados y comprender cómo actúa cada función por separado.

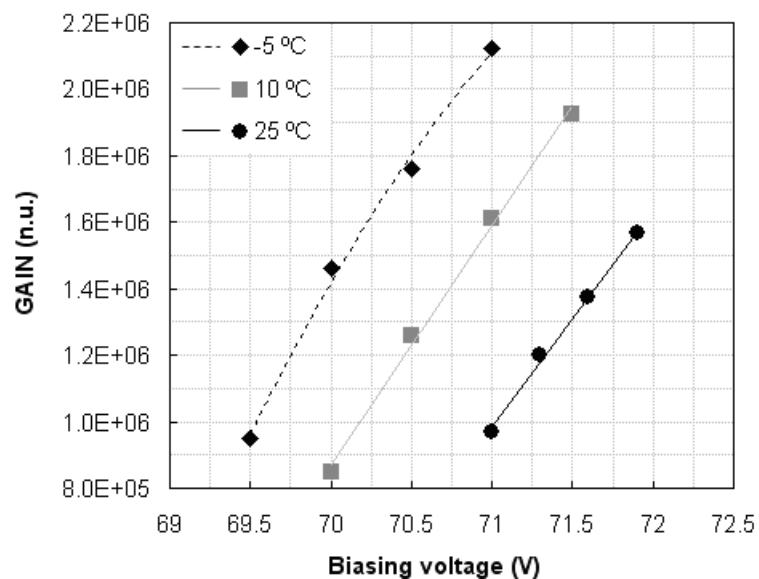
- (2) Implementar las funciones que no se proporcionan y completar las funciones que se dan incompletas.
 - (3) Aplicar la arquitectura a las **medidas** proporcionadas y obtener los parámetros pedidos.
- La arquitectura es como se muestra a continuación. Se proporcionan las siguientes funciones Matlab: **calculatespc.m**, **fitonepeak.m**, **calculatepde.m**, **integratesignal.m** y **commonmessage.m**.

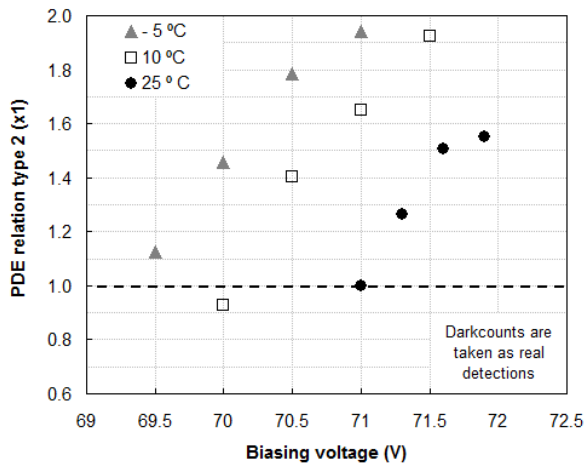
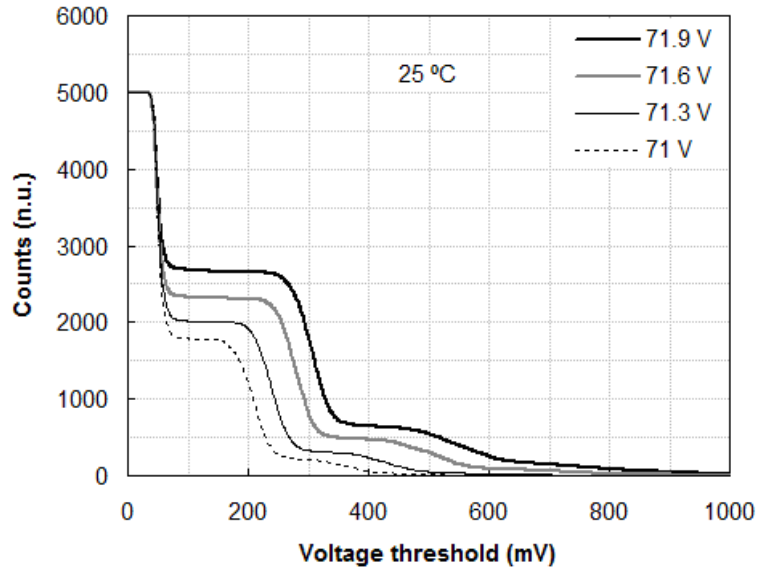


- Todos los programas proporcionados tienen una cabecera con una descripción completa para su uso. En base a estas descripciones y al esquema de la arquitectura, se pide:

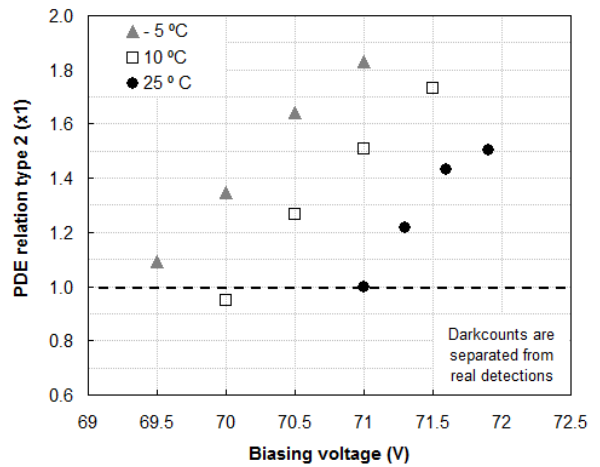
- (1) Diseñar la función **getdistributionmean.m** para cumplir con la descripción dada en su cabecera. Si lo desea, puede hacer uso de la función **integration.m** que también se proporciona.
- (2) Completar la función **calculategain.m** ateniéndose a la descripción que se proporciona en su cabecera y a los comentarios que se incluyen en su definición.

- (3) Completar la arquitectura diseñando la función denominada **darkcountsversusthreshold.m** para cumplir con la descripción dada en su cabecera. Para ello, podemos tomar como referencia la estructura de la función **calculatespc.m**.
 - (4) Aplicar la arquitectura a las **medidas** proporcionadas y obtener gráficas para:
 - (a) Variación de la ganancia en función del voltaje de polarización.
 - (b) Cuentas de oscuridad en función del umbral de detección.
 - (c) Variación relativa de la PDE en función del voltaje de polarización.
- Se deberían obtener resultados similares a los mostrados en las figuras siguientes (tenga en cuenta únicamente la temperatura de 25 °C).





(a)



(b)