

SISTEMA DETECTOR DE RADIACION UV A DIFERENTES BANDAS DE FRECUENCIA

William Galíndez Arias

Director:
Rafael Diez

Ingeniería Electrónica
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá
Colombia

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA
DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

RECTOR MAGNÍFICO: PADRE JOAQUÍN EMILIO SÁNCHEZ GARCÍA S.J

DECANO ACADÉMICO: ING. LUIS DAVID PRIETO MARTÍNEZ

DECANO DEL MEDIO UNIVERSITARIO: PADRE SERGIO BERNAL RESTREPO S.J

DIRECTOR DE CARRERA: ING. JAIRO ALBERTO HURTADO LONDOÑO

DIRECTORES DE PROYECTO: ING. RAFAEL DIEZ

NOTA DE ADVERTENCIA

La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado.

Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia.

Artículo 23 de la Resolución No. 13, del 6 de julio de 1946, por la cual se reglamenta lo concerniente a Tesis y Exámenes de Grado en la Pontificia Universidad Javeriana.

AGRADECIMIENTOS

Ana María Ocaña, Rafael Diez, Magin Flórez, Camilo Otálora , Justo Hernan y Arnold Wiesner

Tabla de contenido

TABLA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
GLOSARIO DE TÉRMINOS	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. MARCO TEORICO.....	12
3.1. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	12
3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN UV.....	13
3.3. SISTEMAS DE MEDICIÓN ULTRAVIOLETA	13
3.3.1. DETECTORES TÉRMICOS:	13
3.3.2. BOLÓMETROS:	13
3.3.3. PIRÓMETRO:	14
3.3.4. FOTODETECTORES	14
4. ESPECIFICACIONES DE HARDWARE Y SOFTWARE UTILIZADO	16
4.1. ARREGLO DE FOTODETECTORES.....	16
4.2. AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA.....	18
4.3. SELECTORES	19
4.4. SUMADOR	19
4.5. OSCILOSCOPIO	20
4.6. CIRCUITO IMPRESO PCB (PRINTED CIRCUIT BOARD)	20
5. DISEÑO Y DESARROLLOS TEÓRICOS.....	20
5.1. SISTEMA DETECTOR.....	21
5.2. CONVERTIDOR DE LUZ EN CORRIENTE Y CORRIENTE EN VOLTAJE	29
5.2.1. COMPORTAMIENTO EN DC	29
5.2.2. ANCHO DE BANDA DEL CIRCUITO	30

5.2.3. REDUCCIÓN DE RUIDO Y TÉCNICAS UTILIZADAS	34
<u>6. ANALISIS DE RESULTADOS</u>	<u>35</u>
<u>6.1. COMPORTAMIENTO DEL OPA657.....</u>	<u>35</u>
<u>6.2. CIRCUITO CONVERTIDOR: LUZ A VOLTAJE RANGO VISIBLE.....</u>	<u>35</u>
<u>6.3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN UV</u>	<u>41</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>54</u>

TABLA DE FIGURAS

Figura 1	Espectro y sus diferentes longitudes de onda	12	
Figura 2	Clasificación de los detectores de radiación UV	13	
Figura 3	Proceso detallado de funcionamiento, explicado por bloques.....	16	
Figura 4	Sensibilidad espectral de los 3 fotodiodos referencia JEC0.1C, JEC0.1B, JEC0.1A.	17	
Figura 5	Amplificador de transimpedancia modelado con capacitancias parasitas	18	
Figura 6	Modelo de selección del fotodetector utilizado en el rango visible	19	
Figura 7	Circuito sumador de voltaje utilizado en el rango visible	20	
Figura 8	Esquema de conexión	20	
Figura 9	Etapas sistema detector.....	21	
Figura 10	Empaque y dimensiones fotodiodo JEC0.1ABC	22	
Figura 11	Respuesta espectral fotodiodo GaP	23	
Figura 12	Empaque.	23	
Figura 13	Respuesta espectral visible	24	
Figura 14	Empaque	24	
Figura 15	Amplificador de fotodiodo básico	25	
Figura 16	Circuito 1	Figura 17 Circuito 2.....	25
Figura 18	Circuito con fotodiodo y resistencia en serie.....	27	
Figura 19	Circuito con amplificador operacional	27	
Figura 20	Circuito 1 Fotodiodo-Resistor	28	
Figura 21	Circuito 2 Fotodiodo-Amplificador Operacional	28	
Figura 22	Vista superior de la configuración de pines OPA657	29	
Figura 23	Circuito Equivalente Amplificador transimpedancia (TIA)	29	
Figura 24	Modelo amplificador transimpedancia	31	
Figura 25	Modelo Ideal de un fotodiodo	32	
Figura 26	Modelo de circuito con tendencia a oscilar, Rf y Cs forman un filtro pasa bajas	32	
Figura 27	Sin el condensador de realimentación, el circuito produjo oscilaciones sostenidas a $f=20\text{MHz}$	33	
Figura 28	Circuito.....	33	
Figura 29	Resistencia de salida según carga capacitiva	34	
Figura 30	Esquemático convertidor I-V.....	36	
Figura 31	Entrada: Luz; Salida: Voltaje	36	
Figura 32	Entrada: Luz; Salida: Voltaje	37	
Figura 33	Conversión luz en voltaje en circuito impreso	37	
Figura 34	Barrido en frecuencia circuito impreso.....	38	
Figura 35	Etapas de TIA en un mismo impreso.....	38	
Figura 36	Sistema detector de radiación visible	39	
Figura 37	Salida total sistema detector en el visible	39	
Figura 38	Señal de salida en ausencia de luz.....	40	
Figura 39	Rango de detección de los diferentes fotodetectores utilizados	41	
Figura 40	Detección de radiación UV con lámpara de 308nm utilizando fotodiodo GaP.....	42	
Figura 41	Respuesta con fotodiodo JEC0.1BC.....	42	

Figura 42 Respuesta con fotodiodo JEC0.1C	43
Figura 43 Respuesta con fotodiodo Thor GaP	43
Figura 44 Selección de todos los fotodetectores, cubriendo todas las longitudes de onda UV	44
Figura 45 Salida en voltaje de todos los detectores cuando no están expuestos a radiación UV.....	44
Figura 46 Habilitan fotodetectores JEC0,1C y JEC0,1BC	45
Figura 47 Señal de salida en el osciloscopio resultante	45
Figura 48 Habilitados fotodetectores THOR GaP y JEC0,1BC	46
Figura 49 Superposición fotodetector Thor GaP y JEC0,1BC	46
Figura 50 Superposición de la señal eléctrica generada por el fotodetector JEC0.1C y Thor GaP	47
Figura 51 Superposición total	48
Figura 52 Superposición total	49
Figura 53 Se encienden los fotodetectores JEC0.1C JEC0.1BC JEC0.1A y ThorGap.....	51
Figura 54 Suma de las señales entregadas por detectores JEC0.1C y JEC0.1BC.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características relevantes fotodiodo JEC.....	17
Tabla 2 Características.....	22
Tabla 3. Características relevantes para el diseño OPA657.....	28
Tabla 4 Resultados con los fotodetectores JEC0,1C y JEC0,1BC habilitados	45
Tabla 5 Variación del voltaje promedio cuando se realiza la superposición de ambas señales, medido con DVM FLUKE 45 y Osciloscopio Agilent DSOX2024.....	46
Tabla 6 Variación del voltaje promedio cuando se realiza la superposición de ambas señales, medido con DVM FLUKE 45 y Osciloscopio Agilent DSOX.....	48
Tabla 7 Selección y combinación de diferentes fotodetectores para determinar los rangos de longitudes de onda donde ocurre la radiación para obtener su respectiva medición.....	50
Tabla 8 Tabla comparativa.....	57

GLOSARIO DE TÉRMINOS¹

1. Área activa [A]: Región o zona en la cual el fotodiodo es capaz de absorber fotones y generar corriente proporcional a los fotones absorbidos
2. Capacitancia de juntura [C_j]: Capacitancia intrínseca de la construcción del fotodetector, su valor depende del voltaje de reversa y área activa específica de cada fotodiodo.
3. Corriente oscura [I_d]: Pequeño valor de corriente que fluye desde el fotodiodo cuando se encuentra polarizado inversamente en ausencia de luz incidente.
4. Degradación: Cuando un detector de luz es sometido a una constante incidencia de luz por largos periodos de tiempo, eventualmente podría presentar distorsión en su señal de salida.
5. Eficiencia cuántica [QE]: Porcentaje de fotones incidentes que se convierten en corriente
6. Filtro: En óptica, un componente propio de cada detector el cual permite al dispositivo brindar una respuesta solamente a determinadas longitudes de onda.
7. Fotoconductor
8. Fotocorriente [I_{PH}]: Flujo de corriente generada por un fotodiodo como respuesta a la incidencia de luz sobre su área activa.
9. Luz incidente: Cantidad de luz que impacta o cae sobre el área activa de un detector, también conocida como irradiancia o *flux*
10. Producto de ganancia por ancho de banda [GBP]: Es el rango de frecuencias o ancho de banda en el cual un amplificador operacional tiene ganancia unitaria. A medida que la ganancia aumenta (resistencia de realimentación), el ancho de banda del amplificador operacional disminuye pero el GBP se mantiene constante.
11. Responsividad: Relación entre la corriente de salida y la luz incidente en determinada longitud de onda.
12. Resistencia Shunt [R_{SH}]: Resistencia interna del fotodiodo, mientras más grande es, menor será el ruido, ésta típicamente posee valores de varios M-ohm
13. Sensibilidad: Constante la cual da información de cuál será la respuesta de un sensor dependiendo de un valor de entrada.

¹ Tomado de [26]

1. INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación CEPIT (Control, Electrónica de Potencia e Innovación Tecnológica) del departamento de electrónica, está trabajando actualmente en un proyecto de desinfección de agua por medio de radiación UV. Dentro de este proyecto es necesario identificar las formas de onda eléctrica que alimentan una lámpara de descarga con barrera dieléctrica, de forma óptima, con el fin de maximizar la radiación ultravioleta de ésta lámpara. Para ello es de alta utilidad tener la medición de UV en un osciloscopio con la misma resolución temporal que la señal eléctrica (aproximadamente $1\mu\text{s}$ por división) de tal manera que se puedan visualizar las dos señales de forma simultánea. Este sistema permitirá optimizar el diseño de los convertidores estáticos que alimentan las lámparas.

El sistema sensor de radiación UV que se diseñará usando fotodetectores tendrá una respuesta, o en otras palabras una sensibilidad a la luz cuya longitud de onda esté comprendidas entre 150 nm y 400 nm. La realización de este sistema se hace necesaria debido a que los arreglos de fotodetectores existentes y disponibles en el mercado en su mayoría cubren solamente longitudes de onda pertenecientes a la banda de luz visible [1].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un sistema detector de radiación UV que entregue una señal eléctrica a un osciloscopio y que sea capaz de seleccionar y combinar diferentes rangos de longitudes de onda.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir señal de radiación UV en el tiempo, con una resolución de $1\mu\text{s}/\text{div}$.
- Entregar señal eléctrica con características de impedancia de salida compatible con osciloscopio.
- Seleccionar y combinar diferentes rangos de longitudes de onda para su respectiva medición.
- Ajustar y seleccionar las bandas del espectro electromagnético de interés, dependiendo del tipo de foto detector que se escoja.

3. MARCO TEORICO

3.1. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación UV o ultravioleta es la radiación electromagnética cuyas longitudes de onda están comprendidas entre los 100 nm y 400 nm. En el espectro electromagnético, la región ultravioleta está ubicada entre la región visible y la de rayos X [2].

Por convención la región UV se divide en 3 bandas de radiación:

UV-A: Comprende longitudes de onda de los 320nm a 400nm

UV-B: Banda de los 280nm a 320nm

UV-C: Longitudes de onda menores a 280nm

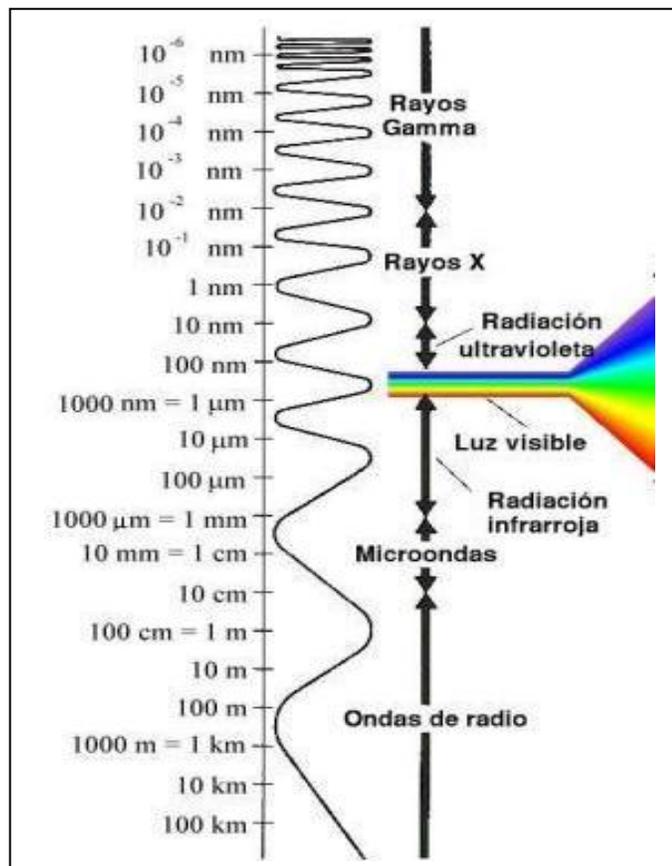


Figura 1 Espectro y sus diferentes longitudes de onda ²

² Imagen tomada de [28]

3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN UV.

La división más general de los detectores de radiación UV es básicamente entre detectores térmicos y fotodetectores

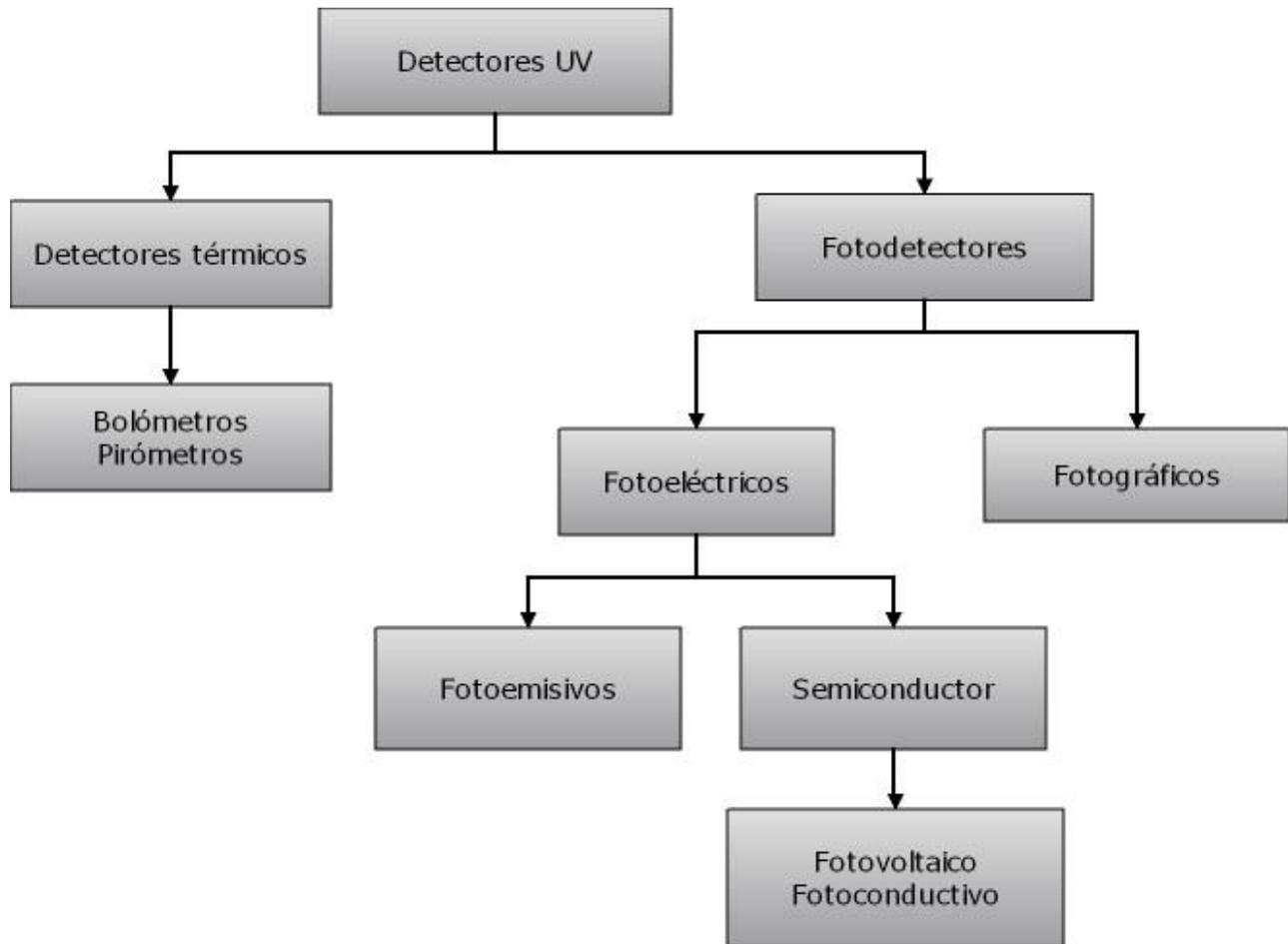


Figura 2 Clasificación de los detectores de radiación UV ³

3.3. SISTEMAS DE MEDICIÓN ULTRAVIOLETA

3.3.1. Detectores térmicos:

Los detectores térmicos basan su funcionamiento de acuerdo a la variación de la temperatura del material que los constituye debido a la radiación incidente, entre estos se destacan:

3.3.2. Bolómetros:

Este detector térmico mayormente utilizado en la región infrarroja y del visible [3], está constituido generalmente por dos placas delgadas de metal, una de ellas es un elemento que absorbe el calor, el cual está conectado por medio de una resistencia a otro componente disipador de calor que se encuentra a una temperatura determinada y constante T_0 . La potencia de la luz incidente que llega al dispositivo absorbente de calor, producirá un aumento en la temperatura del mismo, el cual estará entonces por encima de la temperatura del disipador

³ Imagen tomada de [27]

de calor, de este modo, el bolómetro trabaja midiendo los cambios de temperatura a través de la resistencia que une las placas.

3.3.3. Pirómetro:

Este dispositivo detector de radiación UV, basa su funcionamiento detectando la radiación térmica [4], éste tipo de radiación depende y es directamente proporcional a la temperatura. Un pirómetro realiza mediciones de temperatura a diferentes superficies sin necesidad de estar en contacto con ellas, la medición se lleva a cabo comparando la radiación térmica de la superficie de interés con la radiación proveniente de una fuente interna, típicamente una lámpara incandescente alimentada por una fuente variable que regula su luminosidad. Para tomar una medición, se ajusta la intensidad de la lámpara interna a un valor en el cual entrega una radiación similar al objeto de medición, cuando se logran igualar dichas radiaciones, la corriente que consume la lámpara del pirómetro es traducida a temperatura mediante filamentos y circuitería interna. [5]

3.3.4. Fotodetectores

Generalidades

Sin pérdida de generalidad, un dispositivo fotodetector funciona como transductor de luz, el cual proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación incidente sobre su superficie de absorción fotónica o área activa.

Los fotodetectores se clasifican en Fotoeléctricos y Fotográficos

- **Fotográficos:** Este tipo de fotodetector tiene como ventaja la capacidad de almacenamiento de imágenes aunque la sensibilidad es inferior a la del detector fotoeléctrico. [3]
- **Fotoeléctricos:** Este tipo de fotodetector presenta estabilidad de respuesta y características superiores de linealidad y sensibilidad comparado con los detectores fotográficos. Este tipo de detector así mismo se divide en: [6]
 - Fotoemisorio: Proceso físico que al incidir radiaciones electromagnéticas emite electrones: esto ocurre en el vacío.
 - Semiconductor:
 - ❖ Fotovoltaico: Es el tipo de electricidad que se obtiene de los rayos de sol usando placas solares
 - ❖ Fotoconductor: La conductividad del fotosensor varía con la luz incidente.

Fotodetectores de semiconductor

La fotodetección en semiconductores funciona bajo el principio general de crear pares electrón-hueco debido a la acción de la luz. Un material semiconductor absorbe fotones incidentes, lo cual provoca que los electrones en la banda de valencia salten a la banda de conducción y se comporten como cargas libres capaces de viajar a través de la estructura del semiconductor bajo la influencia de un campo eléctrico externo, esto da lugar a la generación de fotocorriente. [7]

En esta sección se expone la base teórica necesaria para el estudio de los fotodetectores de semiconductor, dispositivos ampliamente utilizados en aplicaciones de detección UV, con un nivel mayor de profundidad, se analizan los parámetros y expresiones analíticas que describen y caracterizan el comportamiento de estos dispositivos.

-Fotoconductor de semiconductor

Existen distintos dispositivos semiconductores aplicables a la detección de radiación fotoconductores:

- Fotodiodos de barrera Schottky: Están constituidos por un semiconductor tipo N y un metal, debido a que tiene solo un semiconductor disminuye la barrera de potencial y la capacidad de difusión aumenta, esto se usa para diodos de alta velocidad de respuesta. [8] Metal-semiconductor-metal está compuesto por dos contactos Schottky sobre un material semiconductor. [9]
- Fotodiodos de unión p-n: Está conformada por un diodo semiconductor, de unión PN, el cual genera una fotocorriente al ser iluminado con una longitud de onda adecuada [10]. Fotodiodos de unión p-i-n: tiene una capa intrínseca entre los extremos p y n, debido a esto la capacidad disminuye haciendo que este diodo sea más rápido que el p-n [11].
- Fototransistores de efecto campo y bipolares: Son dispositivos que detectan la radiación, permitiendo así amplificar la señal que detectan; los fototransistores están compuestos por dos junturas, tres conexiones externas (colector, base y emisor) y en la parte superior tiene una ventana que permite que la luz ingrese. Fototransistores de efecto campo: tiene la unión PN fotosensible con un dispositivo de alta impedancia y amplificadores de bajo ruido [12]

En otras aplicaciones es imprescindible que los dispositivos sean ciegos a las radiaciones visibles e infrarrojas. En este sentido, la utilización de semiconductores con una anchura de banda prohibida adecuada al rango espectral de interés va a permitir evitar la utilización de filtros y reducir los efectos de envejecimiento.

Parámetros característicos

Los parámetros más importantes que caracterizan el comportamiento de los fotodetectores de semiconductor son:

- Responsividad: Fotocorriente generada (I_{ph}) por unidad de potencia óptima incidente (P_{opt}), se expresa en amperios por vatio: [13]

$$R_i = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad (A/W)$$

- Ganancia: número de portadores detectados por par electrón-hueco generado. [3]
- Eficiencia cuántica: número de pares electrón-hueco generados por fotón incidente. [3]
- Contraste: Cociente de la responsividad del detector a la longitud de onda de corte y la responsividad a 400nm: [3]

$$UV/VIS = \frac{R_i(\lambda_{corte})}{R_i(\lambda = 400nm)}$$

- Ancho de banda: Frecuencia a la que su responsividad es la mitad de la responsividad a bajas frecuencias. [3]
- Relación señal a ruido: Cociente del valor cuadrático medio (rms) de la respuesta en corriente del fotodetector dividida entre el valor rms de la corriente de ruido del diodo. [3]

$$S/N = \frac{(I_{ph})_{rms}}{(I_n)_{rms}}$$

- Potencia equivalente de ruido: Potencia óptica necesaria para producir una relación señal a ruido de uno en un ancho de banda de 1Hz; potencia óptica necesaria para producir en un fotodetector una señal de corriente igual al nivel del ruido: [13] [3]

$$NEP = \frac{I_n}{R_i}; I_n: \text{corriente de ruido}$$

- Detectividad: Inversa de la potencia equivalente de ruido. [3]

$$D = \frac{1}{NEP} (W^{-1})$$

4. ESPECIFICACIONES DE HARDWARE Y SOFTWARE UTILIZADO

El sistema detector de radiación UV, cuyo funcionamiento se describe en 4 sencillos pasos, los cuales se resumen y muestran de manera secuencial en el diagrama en bloques a continuación:

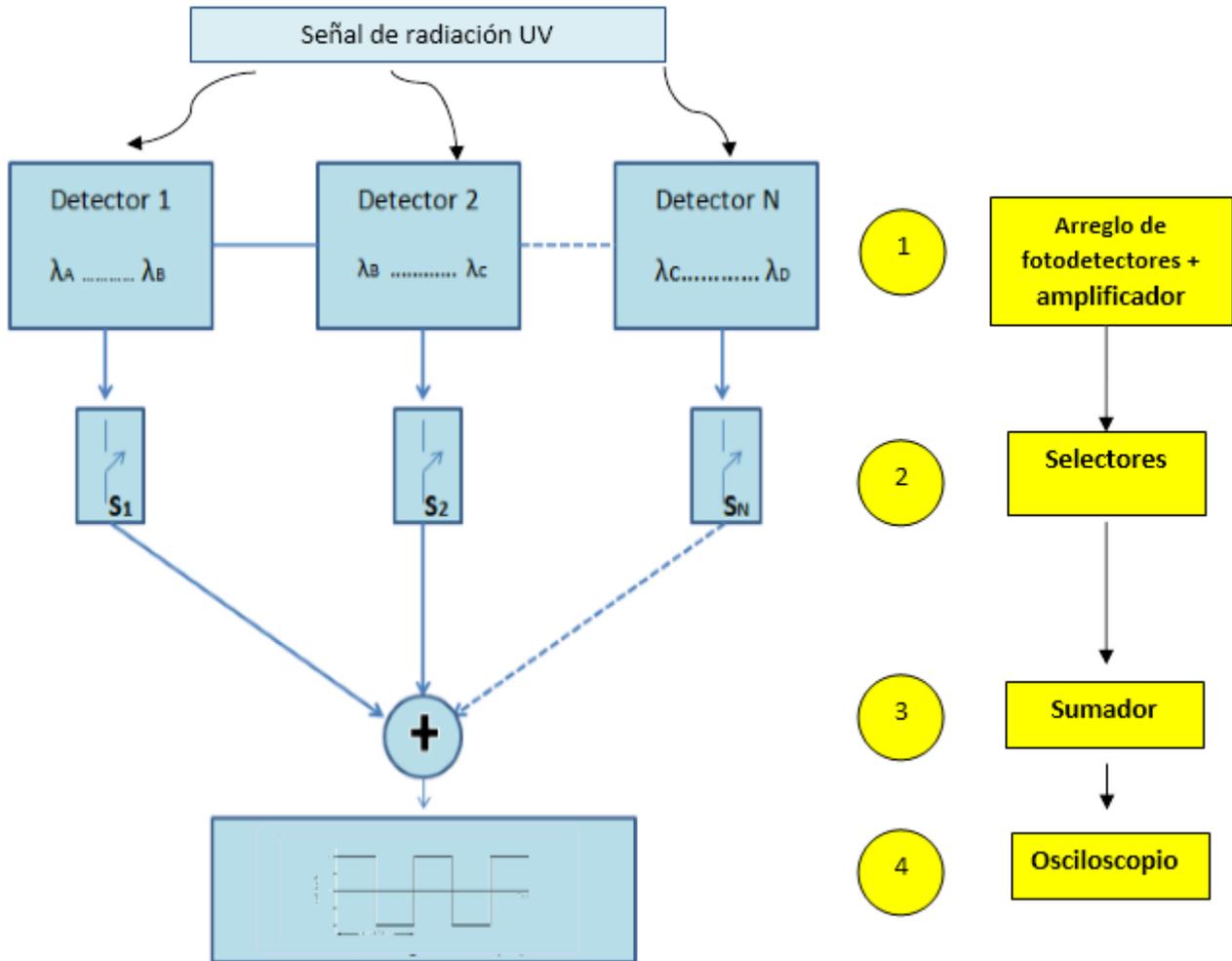


Figura 3 Proceso detallado de funcionamiento, explicado por bloques

4.1. ARREGLO DE FOTODETECTORES

En el esquema propuesto, se puede observar que la señal de radiación UV que proviene de la lámpara, y la cual constituye nuestra señal de entrada para el circuito, llega directamente a estimular el **arreglo de fotodetectores**, los cuales consisten en 3 fotodiodos SiC (Carburo de Silicio) referencia JEC 0.1A, JEC0.1BC, JEC0.1C, y a un fotodiodo GaP SM075 equipados con un filtro que hace que estos componentes solo respondan a longitudes de onda de las bandas UV-A, UV-B, UV-C con un área activa de 0.055mm^2 , diseñados específicamente para aplicaciones de medición UV. A continuación se muestra la respuesta espectral de los fotodiodos o detectores que se utilizaron:

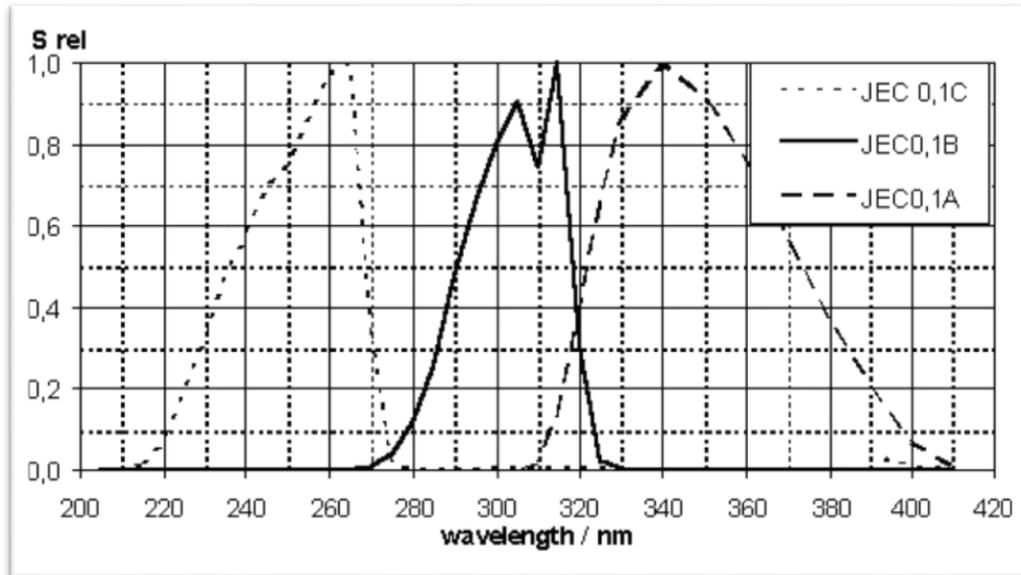


Figura 4 Sensibilidad espectral de los 3 fotodiodos referencia JEC0.1C, JEC0.1B, JEC0.1A. ⁴

Esta información es suministrada por el fabricante de los componentes ELECTRICAL OPTICAL COMPONENTS en la respectiva hoja de especificaciones de cada fotodetector [14].

Como se puede apreciar en la Figura 4, estos dispositivos de detección cubren y responden solamente a longitudes de onda UV. Además poseen una corriente oscura de 1fA la cual es 9 órdenes de magnitud inferior a la fotocorriente generada debido a la incidencia de luz. A continuación se muestra una tabla con los parámetros característicos de cada fotodiodo los cuales representan información clave a la hora de diseñar el sistema detector

Parámetro	Fotodiodo			Unidades
Nombre del componente	JEC 0.1 ^a	JEC0.1B	JEC0.1C	
Área activa del componente	0.25x0.25	0.25x0.25	0.25x0.25	mm ²
Rango espectral	335-395	280-325	220-275	nm
Corriente oscura	1	1	1	fA
Capacitancia de la juntura	21	21	21	pF
Altura del componente	6.8	6.8	4.5	mm
Voltaje de reversa máximo	20	20	20	V

Tabla 1. Características relevantes fotodiodo JEC

⁴ Imagen tomada de [14]

4.2. AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA

Típicamente los circuitos en los cuales está involucrado un fotodiodo, se utilizan amplificadores de transimpedancia, el propósito de estos amplificadores es convertir una corriente de entrada en un voltaje a la salida. Cuando se utiliza un amplificador operacional se reducen los efectos de la impedancia de carga, la impedancia de la fuente de corriente de entrada y se obtiene un mejor ancho de banda. [15]

Un montaje típico de amplificador operacional de transimpedancia se muestra en la Figura 5

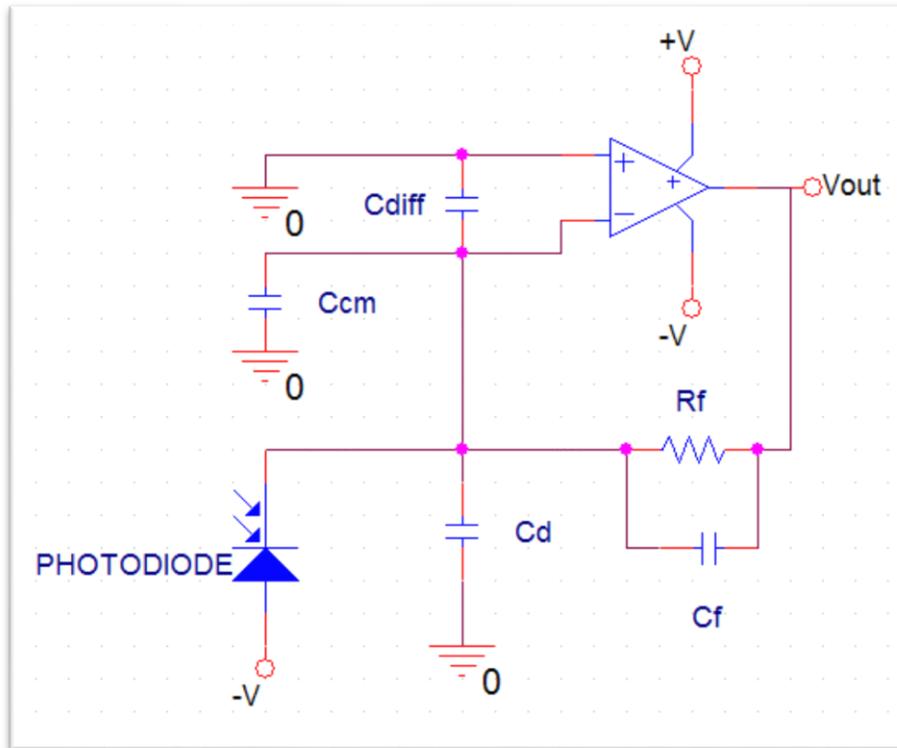


Figura 5 Amplificador de transimpedancia modelado con capacitancias parasitas

En el circuito de la Figura 5 el fotodiodo actúa como generador, entregando una corriente proporcional a la luz incidente sobre su superficie de absorción o área activa, esta corriente es amplificada por la resistencia de realimentación R_f . Despreciando posibles pérdidas se podría considerar que toda la señal generada por el fotodiodo se convertirá en voltaje a la salida. Gracias a la implementación con el amplificador operacional, la impedancia de la fuente o generador se puede despreciar pues está aislada de la salida del circuito. La impedancia de salida es baja lo cual permite conectar una amplia variedad de cargas a la salida. El ancho de banda del circuito es una función de la capacitancia de la fuente C_s , la resistencia de realimentación R_f y el producto de ganancia por ancho de banda del amplificador que se utilice.

C_s = Capacitancia de la fuente

$$C_s = C_D + C_{CM} + C_s + C_{Diff} \quad \text{Ecuación 1. Tomada de [15]}$$

C_s es la suma de la capacitancia interna del fotodiodo y las capacitancias internas del amplificador operacional, tales como la capacitancia de modo común y diferencial. Este valor es importante en el diseño pues como se verá más adelante es un factor crítico que limita el ancho de banda

En la sección de desarrollos se mostrará con detalle los cálculos realizados para el diseño del circuito.

4.3. SELECTORES

Como parte de las características deseadas del sistema detector de radiación UV, se requiere seleccionar a gusto de aquel que manipule el circuito, la banda de frecuencias que desea observar en el osciloscopio, por esa razón deberá existir un esquema de escogencia o encendido de los diferentes fotodiodos.

En la Figura 6 Modelo de selección del fotodetector utilizado en el rango visiblese muestra la forma en que se realiza la conexión entre los fotodetectores y el bloque sumador

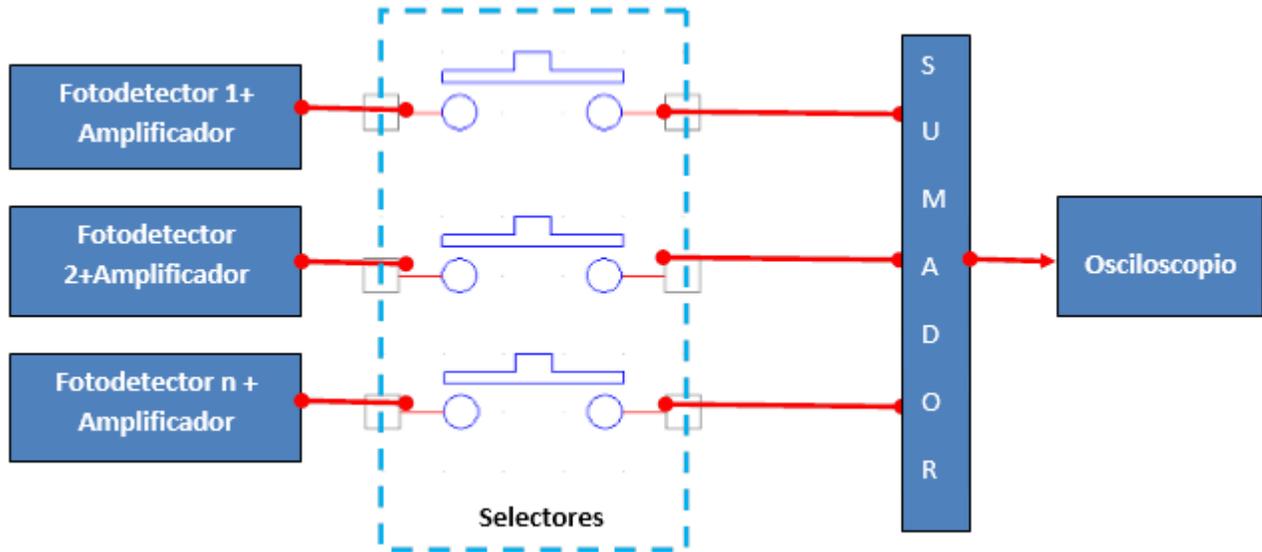


Figura 6 Modelo de selección del fotodetector utilizado en el rango visible

4.4. SUMADOR

La función del bloque sumador es básicamente tomar las señales de voltaje que sean entregadas por los amplificadores de transimpedancia y sumarlas. Cabe resaltar que las señales de voltaje entrantes en esta etapa serán las que estén habilitadas por su respectivo selector, tal como se mostró en el bloque anterior. La suma de señales se podría realizar por medio de un circuito sumador convencional, o utilizando las funciones matemáticas del osciloscopio. En el rango visible donde no se manejan altas frecuencias, esta suma se realiza con un operacional sumador y en el circuito de detección UV la suma se lleva a cabo fuera del alcance de la lámpara como se muestra en la Fig. 8.

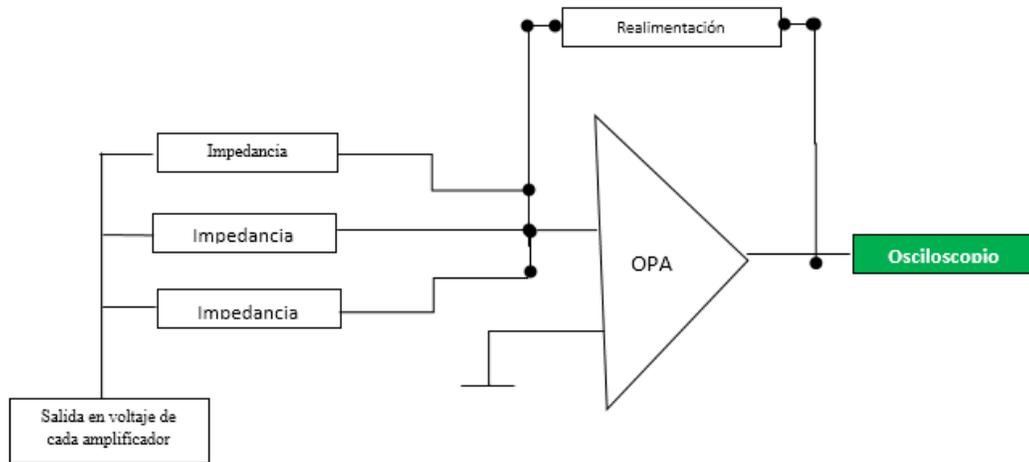


Figura 7 Circuito sumador de voltaje utilizado en el rango visible

Esquema de conexión sistema de detección UV

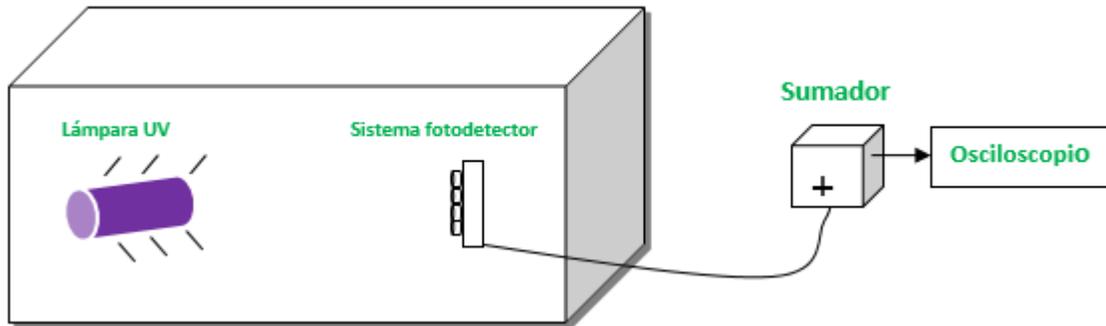


Figura 8 Esquema de conexión

4.5. OSCILOSCOPIO

En este bloque, el objetivo es tener una señal compatible con el osciloscopio, de este modo observarla, ajustarla y extraer la información que sea necesaria. Para llevar lo anterior a cabo, se utilizó cable blindado, conector tipo SMA para aplicaciones RF y un convertidor a BNC Chassis

4.6. CIRCUITO IMPRESO PCB (PRINTED CIRCUIT BOARD)

El circuito impreso es un elemento crítico para funcionamiento del sistema detector, pues este alberga todos los componentes y su importancia es transversal al desempeño de todas las partes que hacen posible la conversión de luz en voltaje, pero además de eso, el circuito impreso eventualmente podría agregar componentes al sistema, componentes que idealmente no se tienen en cuenta, tales como: inductancias o capacitancias parasitas, los cuales podrían afectar dramáticamente el comportamiento del circuito.

5. DISEÑO Y DESARROLLOS TEÓRICOS

Para llevar a cabo el diseño del circuito detector y encontrar los componentes adecuados para la aplicación, se utilizaron los siguientes parámetros de búsqueda: amplificadores operacionales de alta velocidad, producto de ganancia por ancho de banda superior a 500MHz, bajo ruido de corriente y voltaje, además que se tratasen de dispositivos creados especialmente para aplicaciones de detección y muestreo. El resultado de la

búsqueda arrojó que la línea de amplificadores operacionales OPA657 de Texas Instruments es una excelente alternativa, debido a que este amplificador satisface los criterios de selección y además, el fabricante ofrece manuales para la realización de diseños utilizando este producto, herramientas de simulación y muy importante, un canal de fácil acceso a la consecución de estos componentes

El diseño del circuito detector de radiación UV se divide en dos etapas:

1. Circuito detector de radiación visible (Longitudes de onda entre 400nm-700 nm)
2. Circuito detector de radiación UV (Longitudes de onda de 150nm-400nm)

Es decir, se diseñan dos sistemas de detección, el primero de ellos, es un prototipo de pruebas que solamente mide radiación visible, pero que utiliza el mismo amplificador operacional del circuito detector de UV, dicho prototipo se realiza con el fin de caracterizar los amplificadores operacionales (OPA657), familiarizarse con el comportamiento de los componentes pasivos a diferentes frecuencias, depurar problemas de ruido, conexiones, oscilación, validar los cálculos y modelos teóricos que se utilizan en la aplicación y además contar con un circuito que permita inmediatez en el momento de realizar pruebas.

A continuación se hará un recorrido a través de toda la teoría necesaria para realizar el diseño de los sistemas propuestos.

5.1. SISTEMA DETECTOR

Generalmente un sistema detector se divide en 3 etapas:



Figura 9 Etapas sistema detector

➤ EL SENSOR

Como sensor, en el sistema detector de radiación UV se utilizaron dos tipos de fotodetectores:

- Fotodiodo Silicio-carbono (SiC)
- Fotodiodo GaP

Los detectores de Silicio Carbono se utilizan para realizar mediciones de UV de forma más selectiva, pues estos fotodiodos responden únicamente a ciertos intervalos, cuyas longitudes de onda se encuentran dentro del rango UV, como se observa en la tabla 2. Por otro lado, el detector de GaP brinda una respuesta que cubre todo el rango de radiación UV desde 150nm hasta 500nm.

En esta etapa, la intensidad de la radiación UV I_{λ} a determinada longitud de onda λ , cae sobre la superficie o área activa de cada fotodetector, éste último convierte dicha intensidad de radiación I_{λ} en **fotocorriente**. Esta fotocorriente i_{λ} generada por los detectores es muy pequeña y difícil de medir, por lo cual es necesario convertirla a valores más grandes, tal como se hace en la etapa de transimpedancia que se explica en el punto 2.

Los fotodetectores de Silicio-Carbono se caracterizan porque poseen la propiedad de tener una ceguera casi perfecta ante las ondas de radiación pertenecientes al espectro visible, característica deseada y crítica en el diseño del sistema detector de radiación UV, pues evita la necesidad de implementar filtros para rechazar longitudes de onda indeseadas [16].

Los detectores de SiC poseen una respuesta espectral de 200-380 nm y son insensibles a radiación fuera de ese rango, tienen excelente estabilidad frente a cambios de temperatura (coeficiente de temperatura $T_k < -0,06\%/K$)

Características

Parámetro	Fotodiodo			Unidades
Nombre del componente	JEC 0.1A	JEC0.1BC	JEC0.1C	
Área activa del componente	0.25x0.25	0.25x0.25	0.25x0.25	mm ²
Rango espectral	335-395	280-325	220-275	nm
Corriente oscura	1	1	1	fA
Capacitancia de la juntura	21	21	21	pF
Altura del componente	6.8	6.8	4.5	mm
Voltaje de reversa máximo	20	20	20	V

Tabla 2 Características.

Empaque o factor de forma

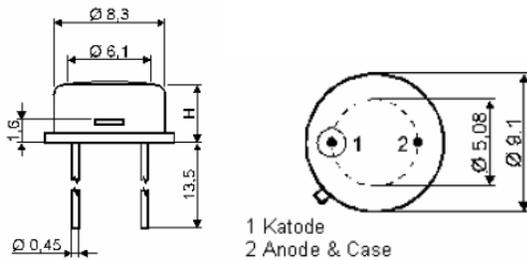


Figura 10 Empaque y dimensiones fotodiodo JEC0.1ABC⁵

Fotodiodo GaP

El detector de GaP SM05PD posee una respuesta que cubre desde 150nm hasta 550nm, tal como los fotodetectores descritos anteriormente, éste dispositivo provee una señal de fotocorriente proporcional a los fotones que absorbe en su área activa [17].

Respuesta espectral

⁵ Imagen tomada de [16]

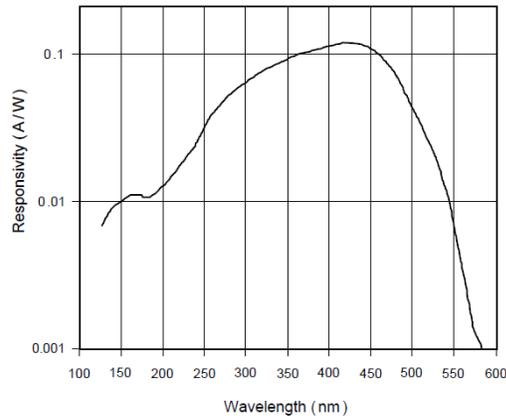


Figura 11 Respuesta espectral fotodiodo GaP ⁶

Empaque o factor de forma

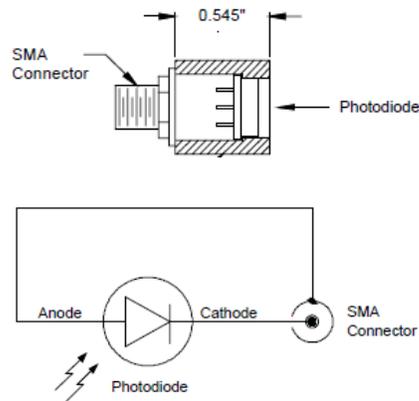


Figura 12 Empaque. ⁷

Fotodiodo PIN

Como se mencionó anteriormente, parte del proceso de diseño del circuito detector de radiación UV, incluyó un sistema de prueba para detectar únicamente radiación del rango visible, para lograr esto, lo único que es necesario cambiar respecto al circuito original de detección UV, es el sensor, para este fin se utiliza un fotodiodo PIN OP910W, el cual responde a longitudes de onda del rango visible. [18]

- Respuesta Espectral

⁶ Imagen tomada de [29]

⁷ Imagen tomada de [29]

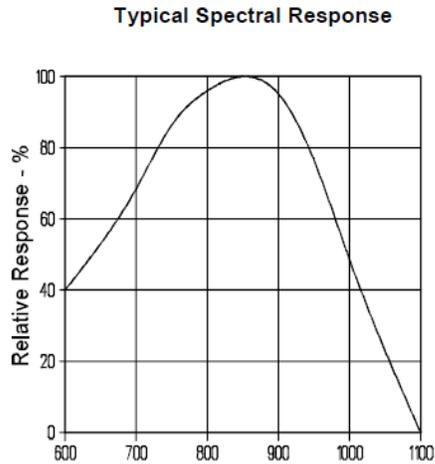


Figura 13 Respuesta espectral visible ⁸

- Empaque o factor de forma

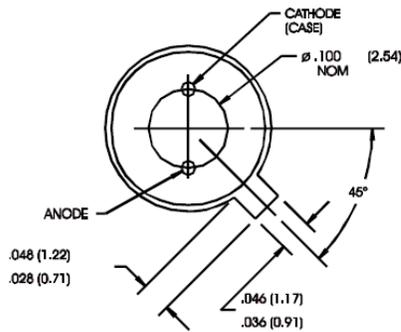


Figura 14 Empaque ⁹

➤ CONVERTIDOR I-V

Etapa de transimpedancia

- Amplificador de fotodiodo básico

El propósito de esta etapa es simple: convertir una corriente de entrada (típicamente la corriente generada por un fotodiodo) en un voltaje de salida V_{OUT} . Utilizando un amplificador operacional en malla cerrada, realimentado con un resistor, es una alternativa fácil y efectiva para lograr convertir corrientes pequeñas en voltajes fáciles de medir.

⁸ Imagen tomada de [18]

⁹ Imagen tomada de [18]

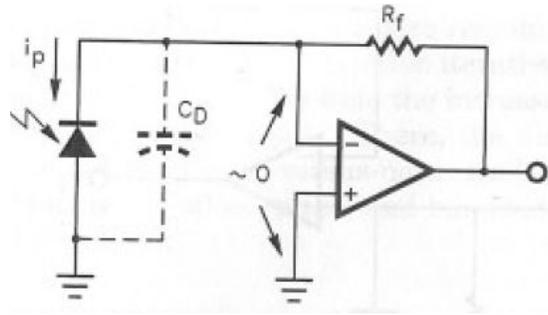


Figura 15 Amplificador de fotodiodo básico ¹⁰

Ventajas del convertidor de corriente- voltaje

El amplificador de fotodiodo básico o convertidor de corriente en voltaje mostrado en la 12, reduce la capacitancia C_d del fotodiodo y la señal de voltaje a través del fotodiodo a cero, pues, gracias al efecto de la realimentación, la entrada inversora y no inversora del amplificador son forzadas al mismo valor de voltaje, presentando así una tierra virtual ante la salida de corriente del fotodiodo. En este orden de ideas, la señal de voltaje resultante en la salida, se encuentra aislada del fotodiodo traduciéndose este efecto en un mayor ancho de banda en el circuito. [15].

- Demostración experimental: Ventajas del amplificador de fotodiodo

Pero si el objetivo es convertir corrientes pequeñas en voltaje, ¿por qué no utilizar un fotodetector con una resistencia en serie? Sería menos costoso y más fácil de implementar. Para responder la pregunta se hicieron las siguientes pruebas, donde se muestra el comportamiento del fotodetector o sensor de luz utilizando 1). Un circuito simple de sensor y resistencia en serie y 2). El fotodetector con amplificador operacional

Nota: Para la evaluación de estos circuitos de prueba se utilizó un fotodiodo de de silicio cuyo rango espectral cubre el visible referencia OP910W y el OPA657

➤ MEDICIONES:

Circuito de prueba

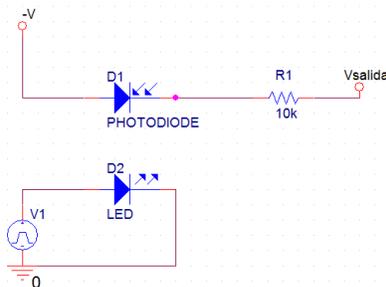


Figura 16 Circuito 1

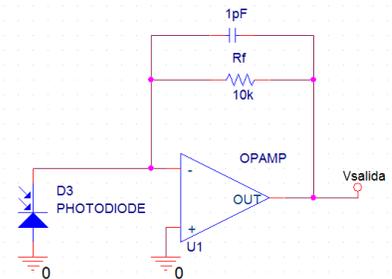


Figura 17 Circuito 2

¹⁰ Imagen tomada de [20]

Al exponer un fotodiodo de silicio referencia OP910W cuyo rango espectral se muestra a continuación, con un LED de alta luminosidad blanco, se obtuvieron las siguientes formas de onda a diferentes frecuencias de la luz emitida por el LED:

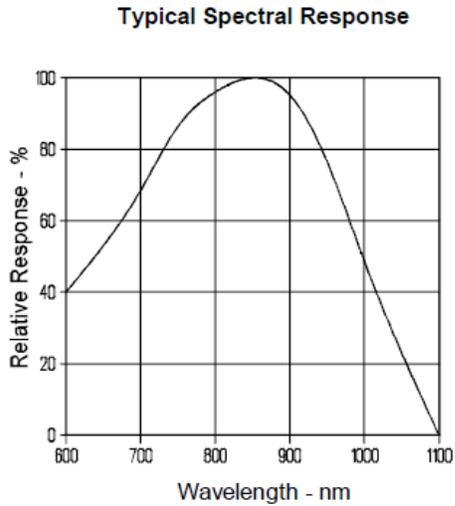


Figura 15 Respuesta espectral fotodiodo OP910W



Figura 16 Montaje de prueba del circuito 1

Equipos para realizar las pruebas de medición

- Fuente Amrel LPS 304 ajustada a 5V
- Osciloscopio Agilent DSO X 2024. 200MHz
- Generador de funciones Hewlett Packard 3312A. Entregando señal cuadrada con 2,5Vpp
- Fotodiodo OP910W

➤ **Frecuencia del LED verde 100Hz**

Circuito con fotodiodo y resistencia en serie

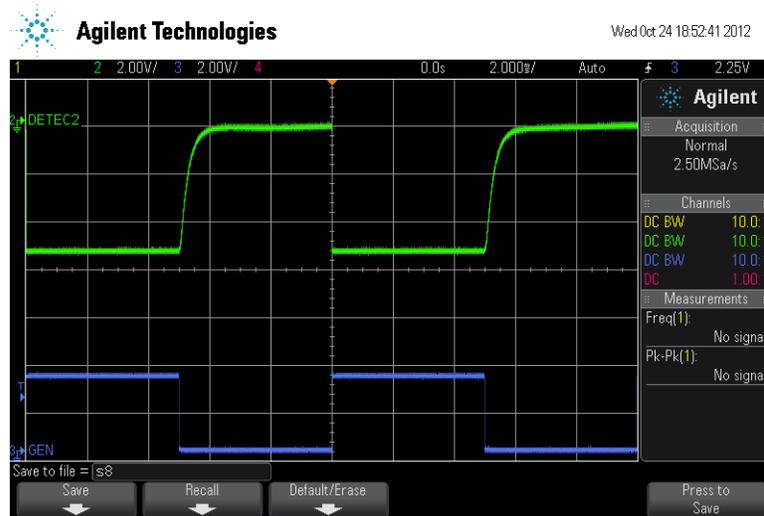


Figura 18 Circuito con fotiododo y resistencia en serie

Señal verde: Voltaje de salida. Señal Azul: Generador conectado al LED

Circuito con amplificador operacional

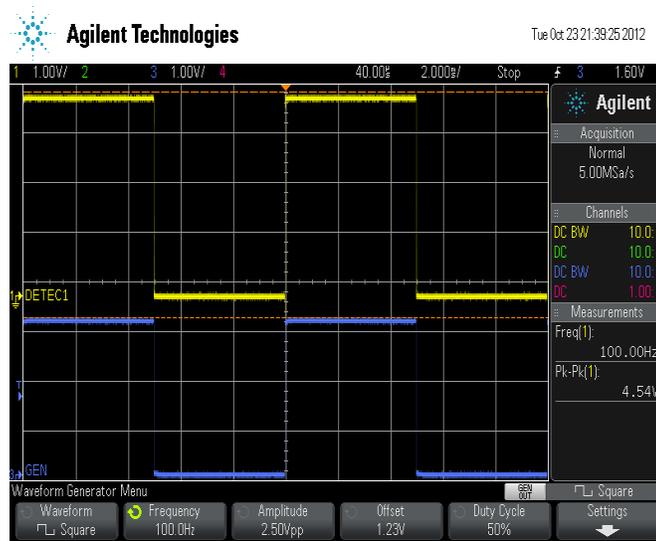


Figura 19 Circuito con amplificador operacional

- Frecuencia del LED verde 100kHz



Figura 20 Circuito 1 Fotodiodo-Resistor

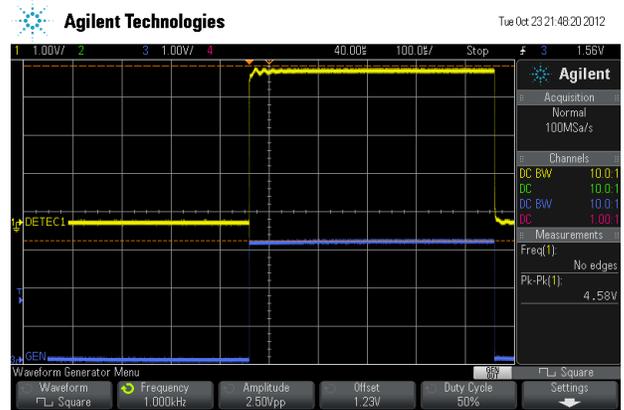


Figura 21 Circuito 2 Fotodiodo-Amplificador Operacional

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, donde se puede observar las señales de voltaje en el osciloscopio, resulta evidente la ventaja que representa utilizar un amplificador operacional en lugar de una resistencia, en este orden de ideas, respondiendo a la pregunta planteada antes de mostrar el desarrollo de éstas pruebas: Se utiliza un amplificador operacional en la etapa de transimpedancia, debido a que al utilizar estos componentes se obtiene mayor velocidad, la ganancia que se puede lograr no está limitada por la impedancia de carga y además cuando se utiliza un amplificador operacional, la impedancia inherente del fotodiodo está aislada de la salida.

Implementación circuito de prueba en el rango visible

Con el ánimo de investigar y documentar el comportamiento del amplificador de fotodiodo. Y de éste modo elaborar un repositorio de problemas y/o solución a estos, se realiza el montaje de un prototipo detector de luz visible, donde el principio de funcionamiento de este sistema prototipo será el mismo que se utilizará cuando de detección UV se trate.

El amplificador operacional utilizado para este propósito es el OPA657 [19] de Texas instruments, el análisis que conlleva a la escogencia de este dispositivo se muestra en la sección de ANEXOS 1.2 titulada “Escogencia amplificador transimpedancia”, donde se exponen los argumentos electrónicos y comerciales que concluyen que este amplificador es la mejor alternativa para realizar el diseño

Características OPA 657 más relevantes para el diseño

Parámetro	Unidades
Fuente de voltaje	±5V
Ganancia * Ancho de banda	1.6GHz
Slew Rate	700V/μs
CMRR	89dB
Input voltage noise	4.8 nV/√Hz
Input current noise	1.3 fA /√Hz
C _{CM} +C _{Diff}	5,2pF
Ganancia malla abierta	70 dB

Tabla 3. Características relevantes para el diseño OPA657

Para información más detallada consulte la hoja de especificación del producto [19].

Empaque OPA657 SO-8

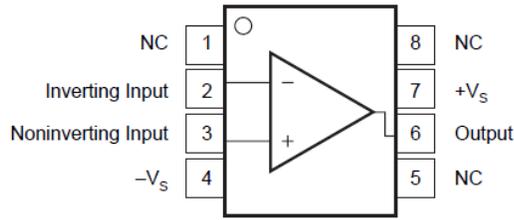


Figura 22 Vista superior de la configuración de pines OPA657 ¹¹

5.2. CONVERTIDOR DE LUZ EN CORRIENTE Y CORRIENTE EN VOLTAJE

El diseño de un circuito el cual convierte luz en corriente y corriente en voltaje utilizando un amplificador operacional, en este libro se divide en 3 partes:

1. DC
2. Compensación ancho de banda y estabilidad
3. Reducción del ruido

5.2.1. Comportamiento en DC

En este punto del diseño se establece la ganancia en DC y se asegura que el circuito esté polarizado correctamente (en región activa) para garantizar su correcto funcionamiento.

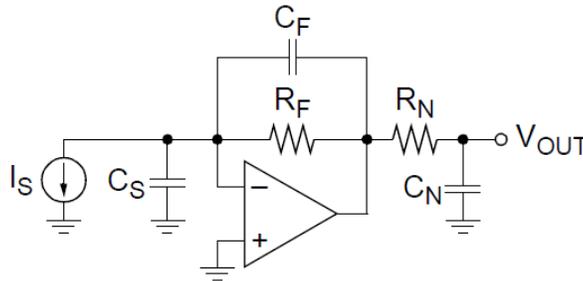


Figura 23 Circuito Equivalente Amplificador transimpedancia (TIA) ¹²

Donde:

$$V_{OUT} = I_S \cdot R_f \quad (\text{Voltaje en la salida})$$

El amplificador operacional contribuirá a la salida con un voltaje *offset*

$$V_{OS} + I_B R_f = \text{Voltaje Offset en la salida}$$

Donde:

V_{OS} = Voltaje *offset* de entrada (*Input offset voltage*)

¹¹ Imagen tomada de [19]

¹² Imagen tomada de [15]

I_B = Corriente de entrada amplificador operacional (*Input bias current*)

5.2.2. Ancho de banda del circuito

Cálculo ancho de banda detector en el rango visible

Requisitos de diseño:

- Ancho de banda BW $\geq 10\text{MHz}$

Elementos e información clave necesaria para realizar diseño de amplificador de transimpedancia:

- Capacitancia del diodo del fotodetector C_D
- Ganancia de transimpedancia (Resistor R_f de realimentación)
- Producto de ganancia por ancho de banda del amplificador operacional utilizado (GBP)

Empezando el diseño del circuito partiendo del ancho de banda requerido para la aplicación, se utilizó la siguiente expresión, obtenida de *Designing High Speed Transimpedance Amplifiers* de Texas Instruments [15].

$$GBP = 2\pi * F_{-3dB}^2 * R_f C_S \text{ Ecuación 3.}$$

Despejando para el ancho de banda

$$F_{3dB} = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_f C_S}} \text{ Ecuación 4 tomada de [15].}$$

$$\text{Donde } C_S = C_D + C_{CM} + C_{Diff}$$

Donde:

GBP: Producto de ganancia por ancho de banda 1.6GHz para el OPA657

F_{-3dB}: Ancho de banda

R_f: Resistencia de realimentación

C_S: Suma de las capacitancias del fotodiodo y amplificador operacional.

Valores conocidos:

- Ancho de banda requerido: $\geq 10\text{MHz}$
- GBP OPA657: 1.65GHz
- Capacitancia total de la fuente emisora de corriente $C_S = C_D + C_{CM} + C_{Diff} = 30\text{pF}$

Como se requiere un ancho de banda mínimo de 10MHz

$$10\text{MHz} = \sqrt{\frac{1.6\text{GHz}}{2\pi R_f 30\text{pF}}}$$

Solucionando para R_f en la ecuación

$$R_f = 84\text{k}\Omega \sim 82\text{k}\Omega$$

Como se puede observar en la ecuación 4, el ancho de banda del amplificador de transimpedancia depende en de su GBP, resistencia de realimentación y capacitancia intrínseca del fotodiodo que se utilice como sensor.

La ecuación 3 con la cual se calcula el ancho de banda, resulta de evaluar el modelo del amplificador de fotodiodo, tal como se muestra a continuación

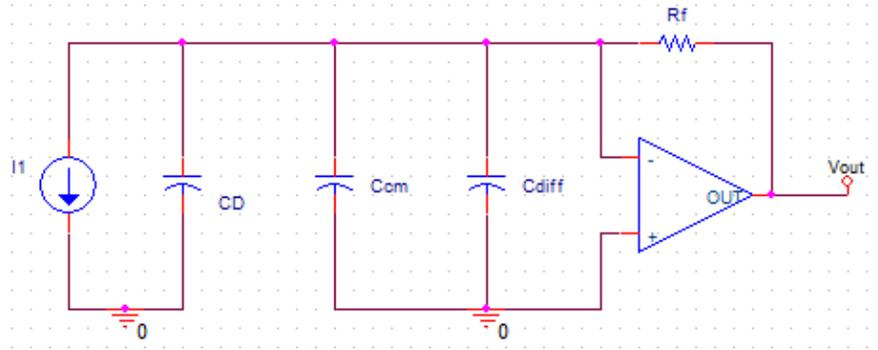


Figura 24 Modelo amplificador transimpedancia

En el anterior modelo se ha reemplazado el fotodiodo por una fuente de corriente en paralelo con su capacitancia intrínseca C_d y el amplificador diferencial está modelado con sus capacitancias parasitas de modo común y diferencial, la ventaja de utilizar este modelo es que permite plantear las ecuaciones como si se tratara de un amplificador de voltaje en voltaje (V/V)

5.2.2.1. Consideraciones de ancho de banda y estabilidad

Además del producto de ganancia por ancho de banda del amplificador y la capacitancia intrínseca de los fotodiodos, existen otros parámetros que determinan el ancho de banda de un convertidor de corriente a voltaje cuando se implementa como amplificador de fotodiodo, el más común de estos parámetros son las **Capacitancias parasitas**: El amplificador diferencial, la resistencia de realimentación e inclusive un mal diseño de circuito impreso, generan capacitancias parasitas que bien podrían provocar limitaciones en el ancho de banda o afectar la operación esperada del circuito.

Por ejemplo, un elemento pasivo como la resistencia de realimentación R_f típicamente tiene una capacitancia parasita asociada, que si el componente es de buena calidad ésta capacitancia será aproximadamente de 0.5pF, pero a medida que el valor de este resistor aumenta, también lo hace su capacitancia parasita, la cual a altas frecuencias podría comportarse como una impedancia menor a R_f y absorber toda la fotocorriente, provocando así una atenuación y una respuesta en frecuencia con un polo ubicado en $f_p = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_p}$; $C_p = \text{Capacitancia parasita}$

5.2.2.2. Compensación de fase

En el punto anterior, se calculó la resistencia de realimentación del convertidor de corriente en voltaje, el circuito resultante se muestra en la Figura 26.

Si además se reemplaza en el circuito de la Figura 26 el modelo ideal del fotodiodo Figura 25.

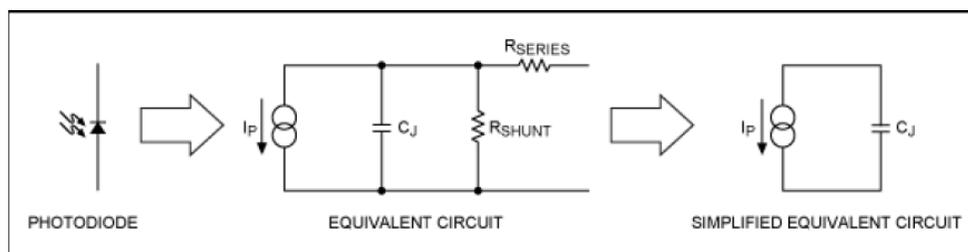


Figura 25 Modelo Ideal de un fotodiodo ¹³

Se obtiene el siguiente circuito:

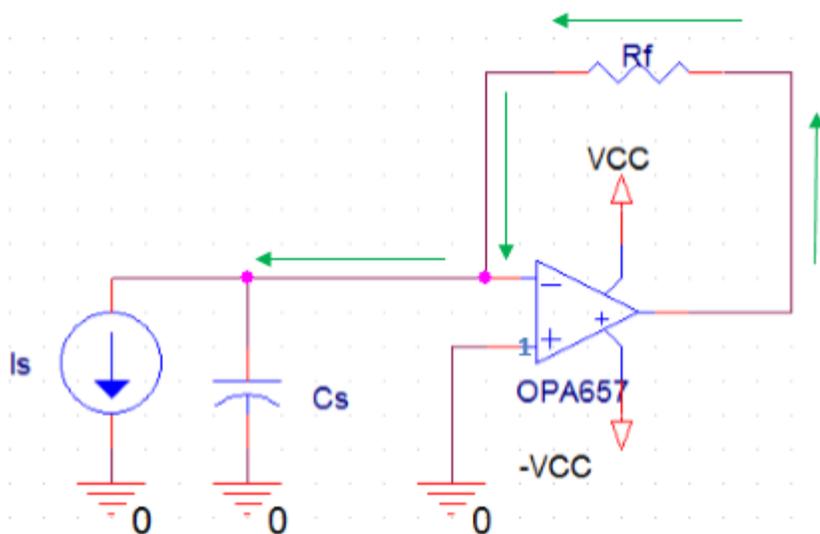


Figura 26 Modelo de circuito con tendencia a oscilar, R_f y C_s forman un filtro pasa bajas

En este punto es necesario prestar gran atención a la capacitancia del fotodiodo, pues ésta será responsable de crear inestabilidad en el circuito, ¿cómo? Observe que la señal de realimentación del circuito va de la salida a la entrada, es decir de los puntos 2 al 1, pasando a través de la resistencia de realimentación R_f y capacitancia del fotodiodo C_d , creando así un filtro pasa-bajas el cual contribuye a un margen de fase negativo en el lazo de realimentación, llevando de esta manera el circuito hacia la inestabilidad [20]

5.2.2.3. Cálculo del condensador de realimentación

En un principio se consideró **no** utilizar la compensación externa, es decir, no conectar el condensador de realimentación, pero fue evidente con base en las pruebas realizadas, la inestabilidad del circuito cuando ésta compensación externa no se realizaba y su tendencia a oscilar, como se muestra en la siguiente figura:

¹³ Imagen tomada de [30]

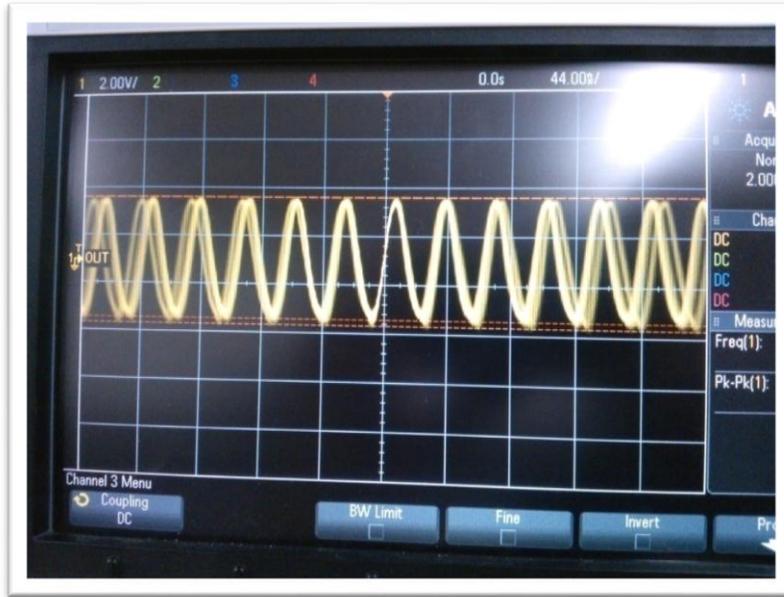


Figura 27 Sin el condensador de realimentación, el circuito produjo oscilaciones sostenidas a $f=20\text{MHz}$

Para eliminar la oscilación en el circuito se utiliza una técnica de compensación externa, la cual consiste en agregar un condensador C_f en paralelo al resistor R_f en la malla de realimentación [21].

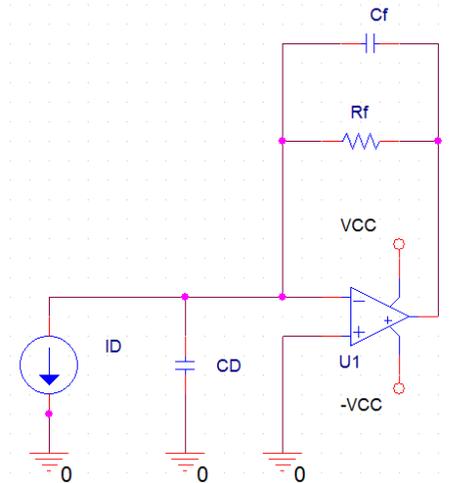


Figura 28 Circuito

Agregar un condensador en paralelo a la resistencia de realimentación provee la compensación requerida para garantizar un margen de fase suficiente y evitar oscilaciones, el valor de la capacitancia necesaria para realizar la compensación se calcula utilizando la ecuación

$$C_f = \frac{1}{4\pi R_f G_{BP} C_D} \left[\sqrt{1 + 8\pi R_f G_{BP} C_D} \right] \quad [22]$$

$$C_f = 10\text{pF}$$

Agregar esta capacitancia C_f al lazo de realimentación provee control en la respuesta en frecuencia del amplificador, además ayuda a atenuar los picos de ruido que podrían presentarse en altas frecuencias

5.2.2.4. Compensación de carga capacitiva

Un amplificador operacional como el OPA657, el cual se caracteriza por ser de alta velocidad y poseer una alta ganancia a malla abierta, puede llegar a ser muy susceptible a perder estabilidad cuando una carga capacitiva es conectada directamente en su pin o terminal de salida. La situación descrita anteriormente en la cual el amplificador puede perder estabilidad por cargas capacitivas se presenta en el momento de utilizar la punta del osciloscopio para observar la señal de salida, siendo que se utilizó el osciloscopio Agilent DXSO 2024 y las puntas que éste instrumento trae representan una carga capacitiva de 12pF para el circuito. Para prevenir los efectos mencionados anteriormente se llevo a cabo una solución simple y efectiva, la cual consiste en aislar dicha carga colocando una resistencia entre la salida del amplificador y la carga capacitiva. [19]

En la hoja de especificaciones del OPA657 se puede observar la siguiente gráfica:

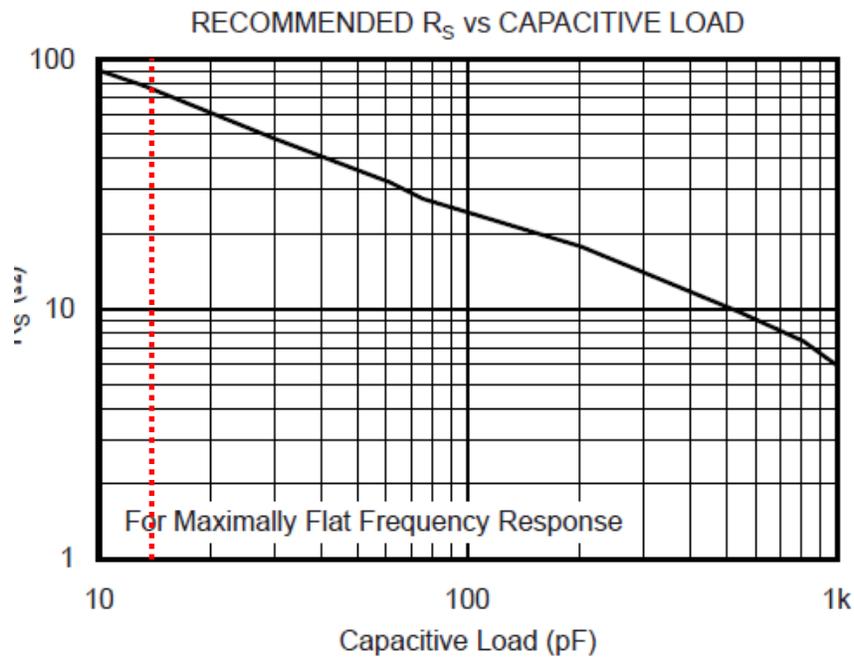


Figura 29 Resistencia de salida según carga capacitiva ¹⁴

La cual indica el valor de resistencia que debería usarse para compensar la carga capacitiva, en este caso se utilizó $R_S=80\Omega$.

En resumen, los desarrollos y cálculos teóricos realizados hasta este punto incluyen:

- Cálculo de resistencia de realimentación. Responsable de la ganancia y de convertir la corriente en voltaje, además se observó que con solamente esta resistencia en el lazo de realimentación, el circuito oscilaba.
- Condensador de realimentación C_f , responsable de controlar la respuesta en frecuencia, atenuar los efectos de la capacitancia del fotodiodo y de éste modo prevenir oscilación.
- Cálculo del ancho de banda del circuito, el cual es función de la resistencia de realimentación y capacitancia del fotodiodo.
- Resistencia de salida para compensar cargas capacitivas.

5.2.3.Reducción de ruido y técnicas utilizadas

¹⁴ Imagen tomada de [19]

Todas las virtudes del OPA657 mencionadas a lo largo de este documento, tales como: bajo ruido de voltaje en la entrada, amplio ancho de banda, gran *slew rate*, alta velocidad, entre otras, podrían verse anuladas y de ésta manera ocasionar que el circuito tenga un comportamiento y rendimiento lejos del esperado si no se toman las medidas necesarias para reducir diversas fuentes de ruido, las cuales fácilmente pueden estropear el diseño y por ende el resultado.

Como primera medida para asegurar un desempeño óptimo del circuito, se siguió paso a paso todas las recomendaciones del fabricante en la elaboración del impreso (PCB). Las recomendaciones que se siguieron se muestran a continuación:

5.2.3.1. Diseño del circuito impreso PCB (Printed Circuit Board) [19]

- Minimizar las capacitancias parasitas: Las capacitancias parasitas en los pines de entrada y salida del OPA pueden causar inestabilidad y en algunos casos limitar el ancho de banda. Para reducir estas capacitancias parasitas, es necesario reducir las distancias entre los pines y los componentes que se conectan a ellos respetando una longitud inferior a $<0.25''$.
- El circuito impreso requiere plano a tierra
- La fuente de alimentación y tierra debe ubicarse lo más cerca posible de los pines de entrada y salida, (a una distancia inferior a $0.25''$). Es recomendable evitar caminos de fuente estrechos para minimizar efectos inductivos.
- **Obligatorio** utilizar condensadores de desacople cerámicos en los pines de cada amplificador y de tantalio en la fuente para filtrar ruidos de bajas y altas frecuencias. [23]
- Utilizar componentes de montaje superficial: Este tipo de componentes presenta una reactancia muy baja, son los que mejor trabajan en aplicaciones donde se manejan distintas frecuencias y además permiten reducir el tamaño del circuito impreso.
- No utilizar bases para realizar la conexión de los amplificadores operacionales, debido a que la longitud extra en los pines introduce capacitancias parasitas que eventualmente podrían provocar oscilación en el circuito. [19]

- Adicionalmente y muy importante el diseño del circuito impreso se basa en una muestra de PCB (*Printed Circuit Board*) diseñado especialmente para aplicaciones de RF por Texas Instruments, el cual incluye información y recomendaciones de diseño, esta muestra resulta de gran utilidad para diseñar el circuito impreso del trabajo de grado. [24]

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. COMPORTAMIENTO DEL OPA657

Trabajar con este amplificador operacional, el cual posee un producto de ganancia por ancho de banda grande $GBP = 1.65\text{GHz}$ presenta un reto interesante en el sentido que, dada la capacidad de éste OPA para responder a altas frecuencias, lo hace susceptible y capaz de ver todas las contribuciones parásitas que típicamente se ignoran en un modelo ideal.

Las primeras pruebas realizadas con este amplificador sobre tarjeta de prototipo, evidencian la importancia de utilizar un circuito impreso, debido a que un cable de conexión entre dos componentes cuya longitud exceda 2cm de longitud puede perfectamente cambiar el circuito equivalente.

En las pruebas que se llevan a cabo a continuación, el objetivo es convertir luz a voltaje, teniendo como señal de entrada una fuente de luz con longitudes de onda pertenecientes al rango visible

6.2. CIRCUITO CONVERTIDOR: LUZ A VOLTAJE RANGO VISIBLE

Esquemático del circuito utilizado en las pruebas 1-3

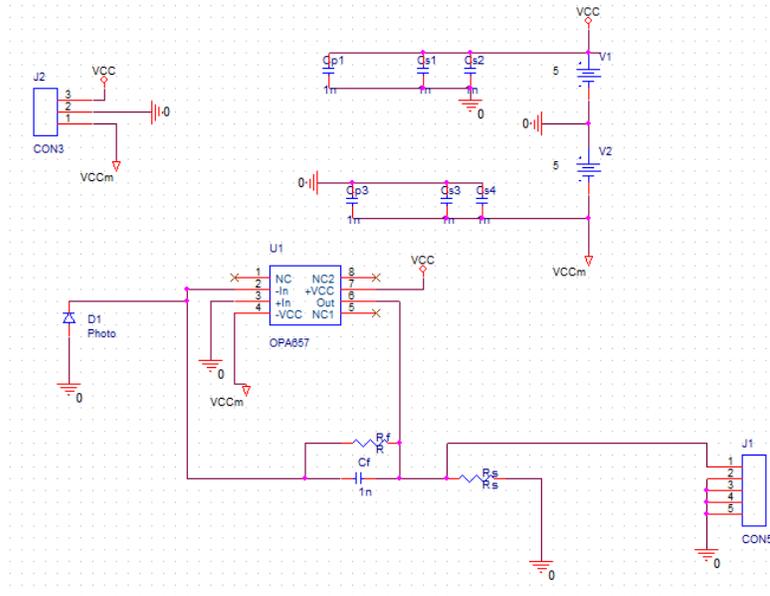


Figura 30 Esquemático convertidor I-V

Prueba 1. Conversión de luz en voltaje utilizando tarjeta de prototipo

Alimentando el fotodiodo OP910W con un LED encendido totalmente utilizando un generador de funciones con onda cuadrada $f=1\text{KHz}$, e impactando sobre toda el área activa del fotodiodo

Se obtienen los siguientes resultados



Figura 31 Entrada: Luz; Salida: Voltaje

Resulta evidente la mala calidad de la señal de salida, presenta un piso de ruido de 2V, el cual se debe a capacitancias parásitas y mal desacople de fuentes, las capacitancias parásitas son provocadas por: cables o caminos de conducción que superan la máxima longitud recomendada por el fabricante, además de la utilización de una base para conectar el amplificador de montaje superficial en *proto*board,

Prueba 2 Conversión de luz en voltaje: Circuito montado en tarjeta de prototipos para soldar

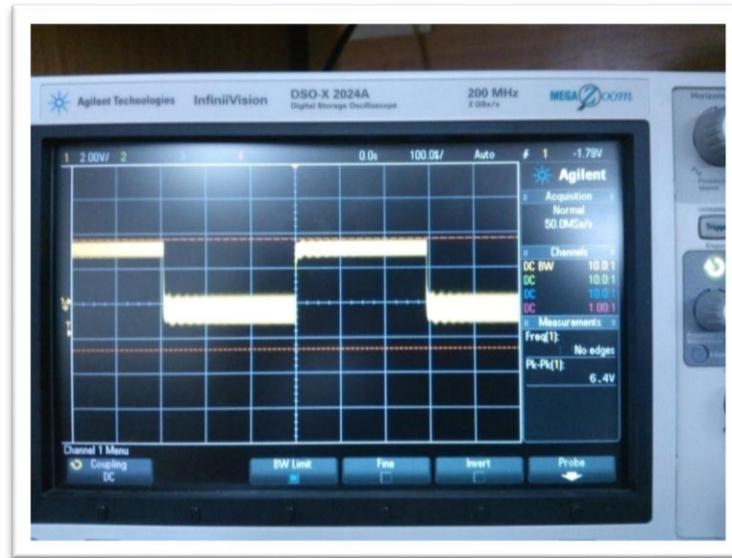


Figura 32 Entrada: Luz; Salida: Voltaje

Esta prueba permite observar como la velocidad del circuito mejora, pero, el ruido presente en la señal de salida sigue siendo un problema. La tarjeta de prototipos para soldar, elimina la necesidad de usar cables, pero la base para conectar el amplificador de montaje superficial continúa siendo requerida.

Además, ésta tarjeta de prototipos posee caminos de conducción muy estrechos y dada la distribución de pines y componentes, algunos de éstos caminos exceden la longitud recomendada por el fabricante, agregando de esta manera cambios al circuito cuyos efectos podrían ser impredecibles.

Prueba 3 Conversión de luz en voltaje. Montaje en circuito impreso

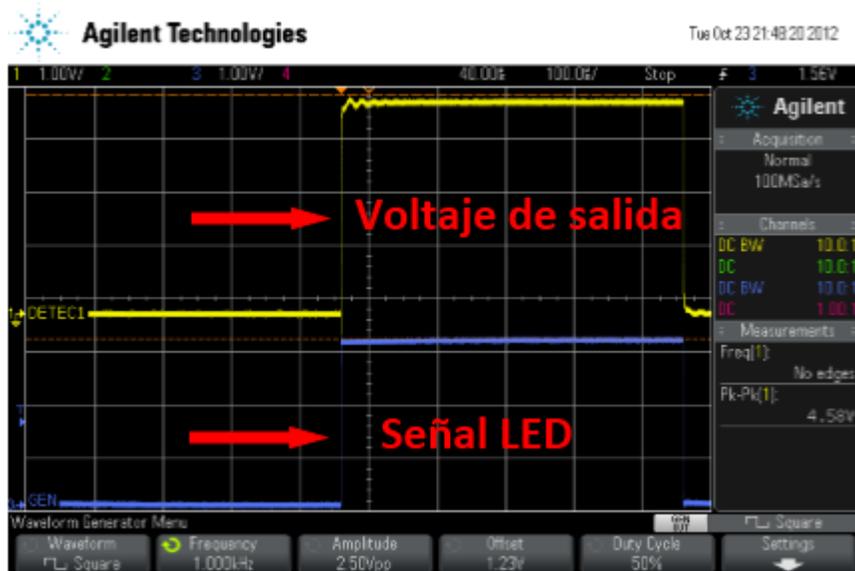


Figura 33 Conversión luz en voltaje en circuito impreso

Resulta evidente como el funcionamiento del amplificador de transimpedancia mejora notablemente cuando el montaje se realiza en circuito impreso y con componentes de montaje superficial, en este punto, ninguno

de los caminos de conducción excede la longitud recomendada, gracias al manejo de Orcad Layout, se ubican todos los componentes lo más cerca posible de los pines de entrada – salida. Adicionalmente el diseño se lleva a cabo siguiendo todas las pautas de diseño mencionadas anteriormente.

Una vez se aseguró que el circuito estaba cumpliendo con su función básica: tomar una señal proveniente de un fotodiodo y convertirla en voltaje, se procedió a verificar que el amplificador de transimpedancia tuviera el ancho de banda requerido, para verificar este parámetro se hace un barrido en frecuencia partiendo de una frecuencia inicial $f_0= 1\text{Hz}$ hasta $f_c= 11\text{MHz}$ con un generador de funciones

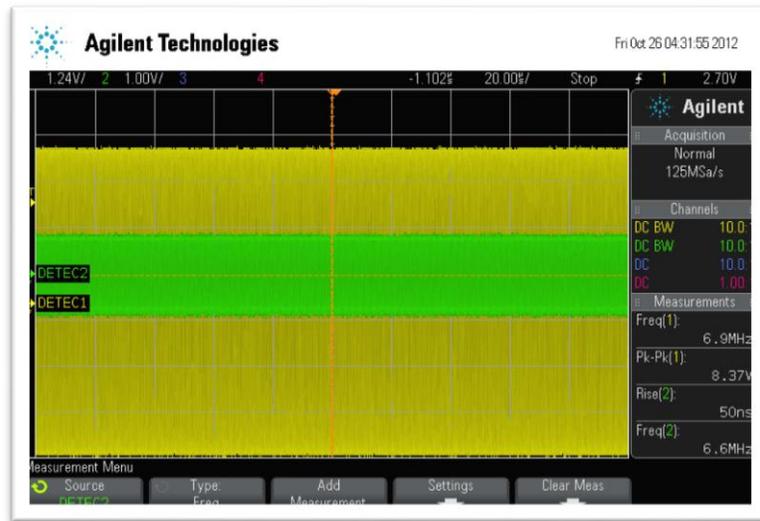


Figura 34 Barrido en frecuencia circuito impreso

Para ver el proceso completo de barrido en frecuencia donde se muestra que el circuito no atenúa -3dB durante el barrido, observe el video Barrido1.mpeg localizado en el DVD de anexos.

Teniendo la certeza que el circuito detector de radiación en el rango visible funcionaba correctamente por sí solo, se procedió a unir en un mismo impreso los 3 amplificadores de transimpedancia, el esquemático se muestra a continuación

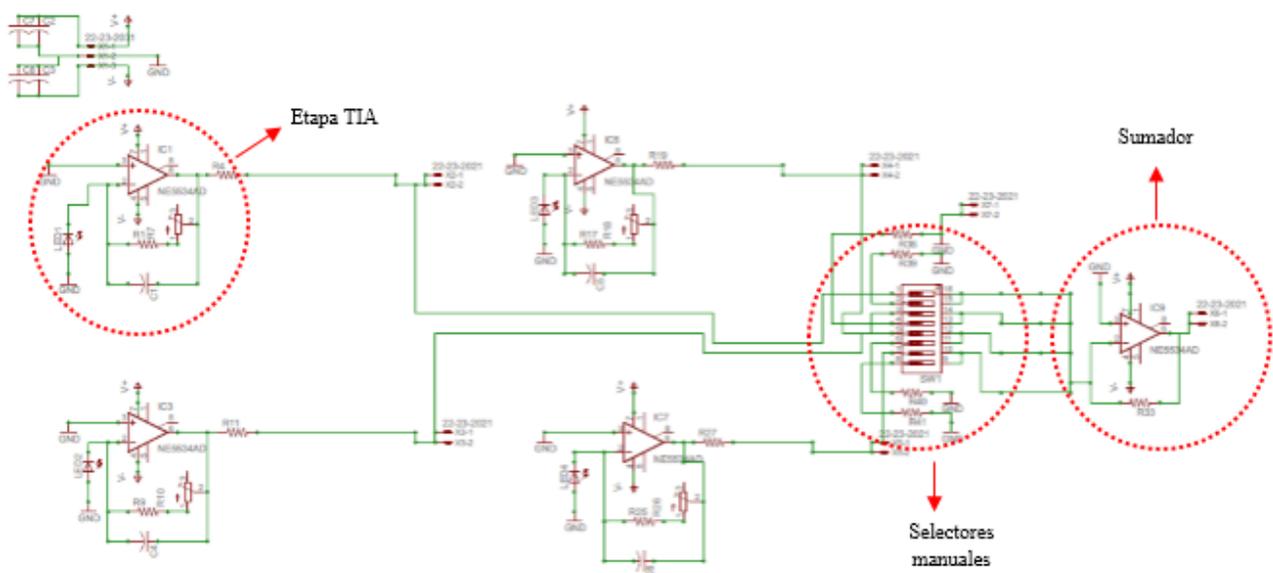


Figura 35 Etapas de TIA en un mismo impreso

Prueba 4. Conversión de luz en voltaje: 4 Etapas de TIA compartiendo el mismo impreso y con selectores manuales. Circuito de la Figura 35.

Al igual que las pruebas anteriores, se generó una fotocorriente en cada uno de los TIAs utilizando un LED emisor de luz de alta luminosidad el cual está siendo encendido y apagado con una señal cuadrada proveniente del generador de funciones con $F=1\text{KHz}$, $V_{pp}=2\text{V}$



Figura 36 Sistema detector de radiación visible

En la Fig.36, se puede ver que las señales de voltaje que provienen del amplificador de transimpedancia no poseen ruido significativo, aparentemente el sistema funciona bien, pero los problemas se presentan al aumentar la frecuencia de la señal cuadrada que enciende y apaga el diodo LED. Lo cual es necesario, pues la aplicación final de este circuito es para detectar radiación UV a altas frecuencias.

Prueba 5. Señal de salida sistema detector a frecuencias superiores a $f=100\text{KHz}$



Figura 37 Salida total sistema detector en el visible

Tal como se observa en la imagen anterior, el ruido degrada la señal de salida, por esta razón es necesario retirar los componentes que no son aptos para altas velocidades y altas frecuencias tales como el sumador y los selectores manuales.

Enseñanzas del sistema detector de radiación en el visible (Prototipo)

El análisis de resultados de los puntos anteriores ayuda a validar cálculos teóricos, pero además permite ganar experiencia en el diseño de amplificadores de transimpedancia, dicha experiencia deja como resultado una serie de recomendaciones para depurar problemas en el funcionamiento del circuito. A continuación se enumeran los problemas más recurrentes y su respectiva solución.

1. Se polariza el circuito, y en ausencia de luz, el voltaje de salida debería ser cero, pero no lo es.

La imagen a continuación, ilustra el problema escrito en el título

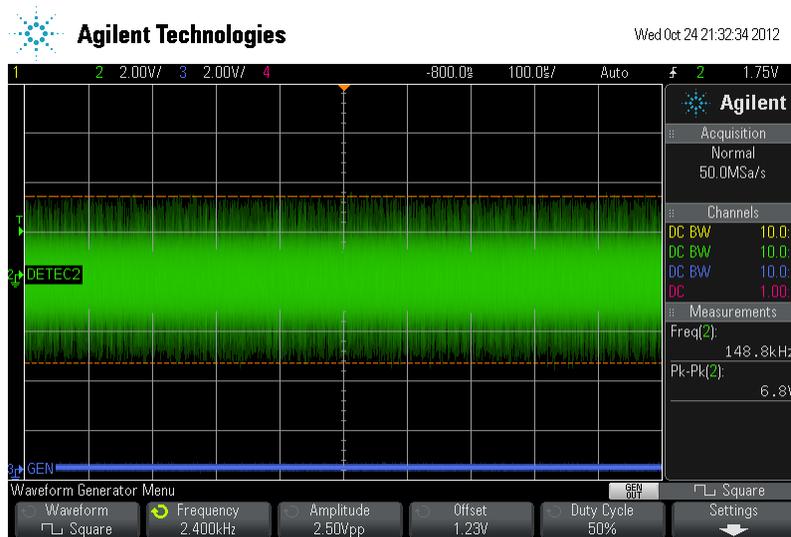


Figura 38 Señal de salida en ausencia de luz

Lo primero que se debe hacer cuando en ausencia de luz, el voltaje de salida tiene un valor significativo ($>200\text{mV}$), es observar en el osciloscopio la señal de las fuentes de polarización $\pm 5\text{V}$ que alimentan el circuito, y verificar que la señal proveniente tenga un valor de voltaje pico a pico menor a 200mV . De lo contrario, se está ante un mal desacople de fuentes. La forma de arreglar este inconveniente es verificar que efectivamente se tiene condensadores cerámicos y de tantalio para altas y bajas frecuencias desacoplando la fuente con los valores que recomienda el fabricante.

2. La señal de salida V_{out} del circuito se deteriora cuando utiliza puntas de osciloscopio X10

Este efecto típicamente se da por un mal manejo de carga capacitiva y un mal acople de impedancias, es necesario consultar en el manual del osciloscopio el valor del condensador de la punta y asegurar que la resistencia de salida R_s calculada sea óptima para aislar dicha carga capacitiva.

Jamás se debe utilizar componentes con terminales de alambre en un circuito para aplicaciones de alta velocidad [19].

3. Diseño del circuito impreso

El circuito impreso se convierte en un componente más del diseño, por esa razón, para aplicaciones de alta velocidad, es necesario seguir todas las recomendaciones que brinda el fabricante, además de apoyarse en técnicas de reducción de ruido y ubicación de componentes, para evitar en lo posible la aparición de componentes parásitos.

6.3. DETECCIÓN DE RADIACIÓN UV

Rango de detección de los diferentes fotodetectores utilizados

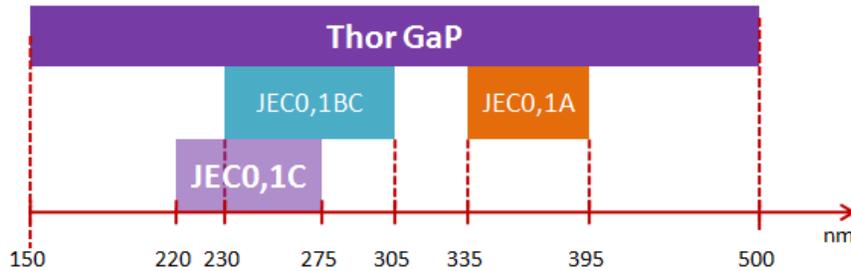


Figura 39 Rango de detección de los diferentes fotodetectores utilizados

Los fotodetectores de SiC nos brindan una medición exclusiva dentro de un rango de longitudes de onda determinado, por otro lado, el detector de GaP responde dentro de todo el espectro de radiación UV, de esta manera en el momento de realizar la detección, se logra obtener una señal de voltaje correspondiente a todos los picos de radiación que ocurren a cualquier longitud de onda perteneciente al rango de UV.

Con la certeza que el sistema detector de radiación en el rango visible funciona correctamente, se procede a utilizar los sensores de SiC y GaP para detectar radiación ultravioleta en el circuito diseñado.

Prueba 6. Detección de radiación UV con lámpara de 308nm utilizando fotodiodo GaP

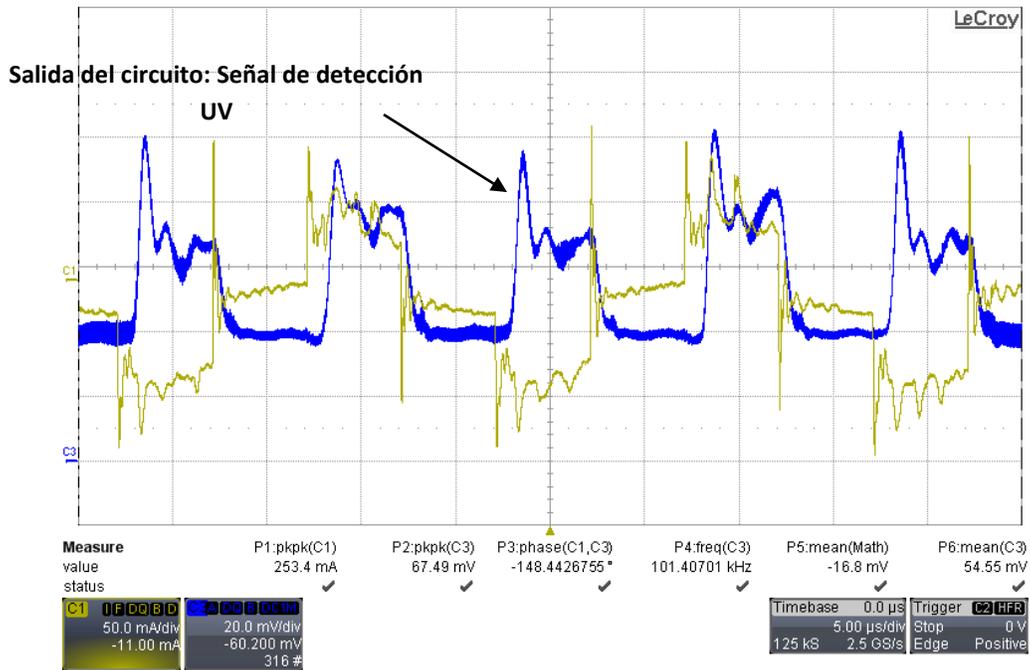


Figura 40 Detección de radiación UV con lámpara de 308nm utilizando fotodiodo GaP

En la imagen se observa que la señal azul, la cual constituye la salida del detector de radiación UV, detecta picos de UV. Cuando hay picos de corriente (mA) detecta picos de radiación UV los cuales se observan gracias al convertidor de corriente en voltaje diseñado en milivoltios.

Para detectar radiación UV comprendida entre 220nm-395nm, se utiliza una lámpara de mercurio PE240T con picos de emisión ubicados en 184nm y 254nm, siendo éste último (254nm) el pico de emisión más fuerte de la lámpara) [25]

La lámpara de mercurio nos permitirá observar la respuesta de los fotodetectores de SiC

Respuesta con fotodiodo JEC0.1BC

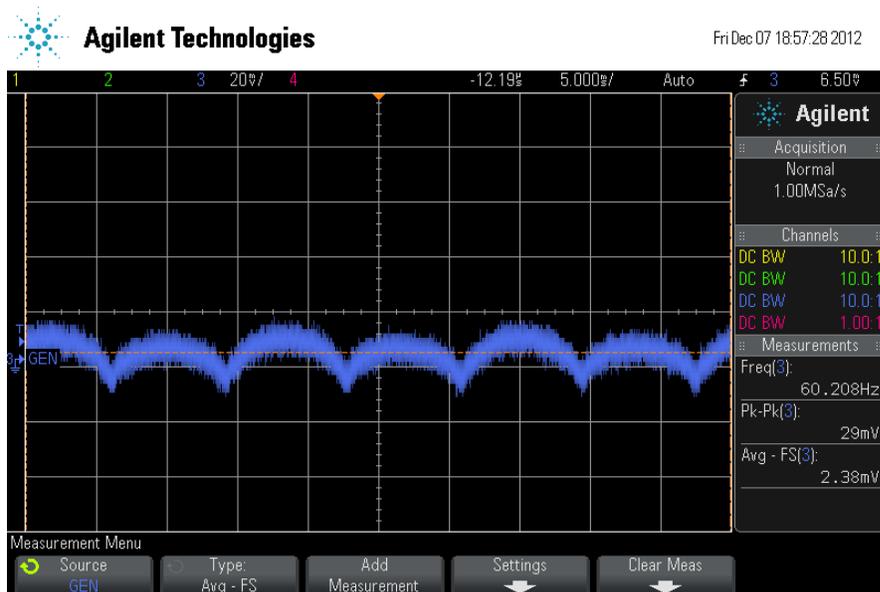


Figura 41 Respuesta con fotodiodo JEC0.1BC

Respuesta con fotodetector JEC0.1C

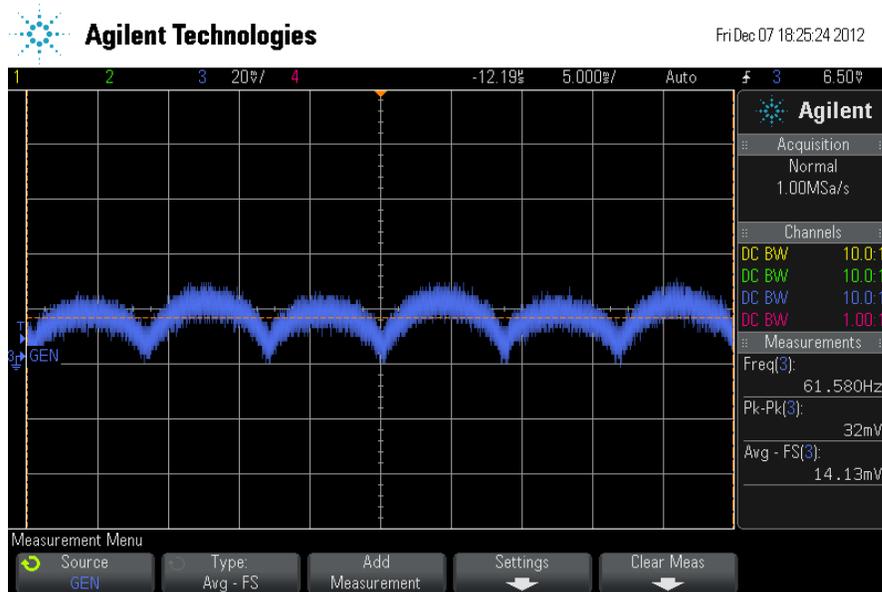


Figura 42 Respuesta con fotodiodo JEC0.1C

Detección con fotodetector Thor GaP

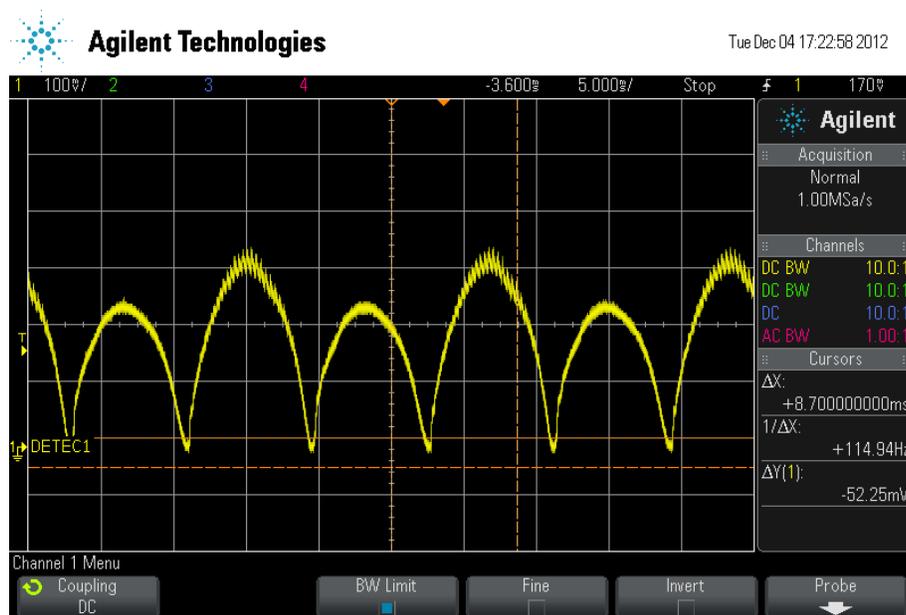


Figura 43 Respuesta con fotodiodo Thor GaP

Selección de todos los fotodetectores, cubriendo todas las longitudes de onda UV



Figura 44 Selección de todos los fotodetectores, cubriendo todas las longitudes de onda UV

En la imagen anterior, se puede observar como el fotodetector JEC0.1A no detecta ningún valor de radiación y por lo tanto la señal de salida en voltaje es nula, pues la longitud de onda de la lámpara de mercurio se encuentra fuera del alcance de su respuesta espectral, resultado esperado y consecuente con la información técnica del fotodiodo.

Detectores en ausencia de radiación UV

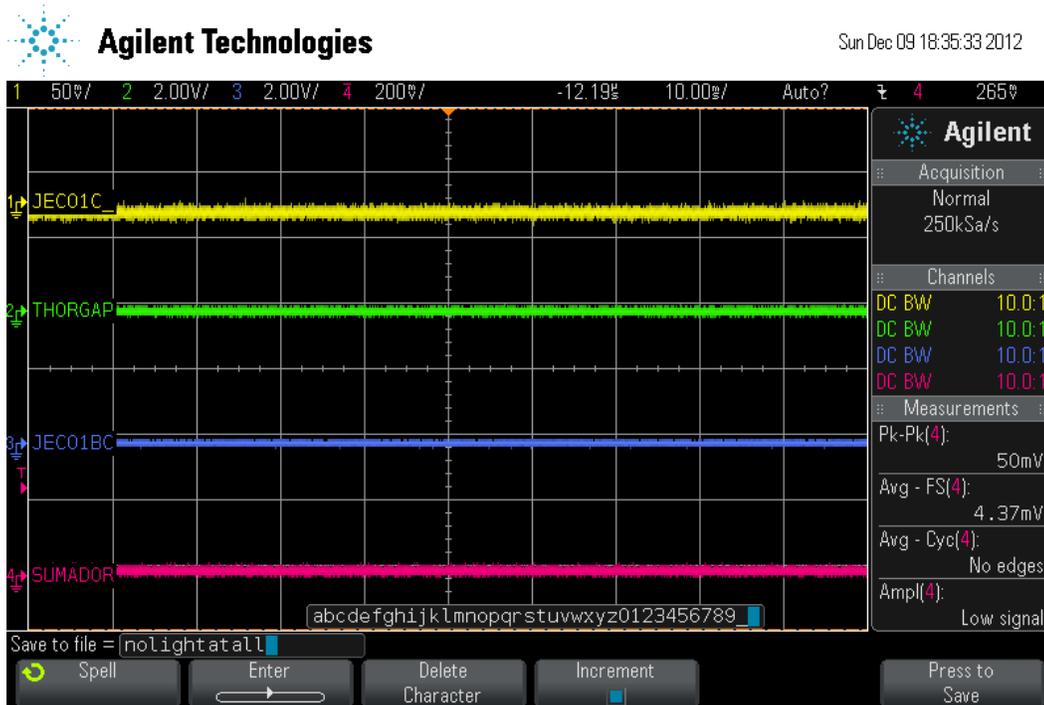


Figura 45 Salida en voltaje de todos los detectores cuando no están expuestos a radiación UV

En la fig anterior se ha utilizado un canal del osciloscopio para observar la salida del sumador análogo, no se observa el fotodetector JEC0.1A, pues como se mencionó anteriormente, este es ciego al rango de frecuencias que ofrece la lámpara UV de mercurio.

Selección y combinación de diferentes rangos de longitudes de onda

En el circuito sumador se habilita solamente el fotodetector JEC0,1C y JEC0,1BC

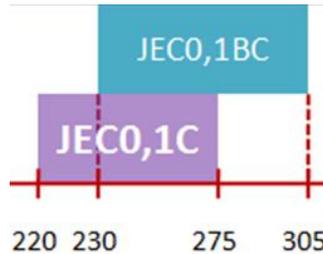


Figura 46 Habilitan fotodetectores JEC0,1C y JEC0,1BC

Señal de salida en el osciloscopio resultante

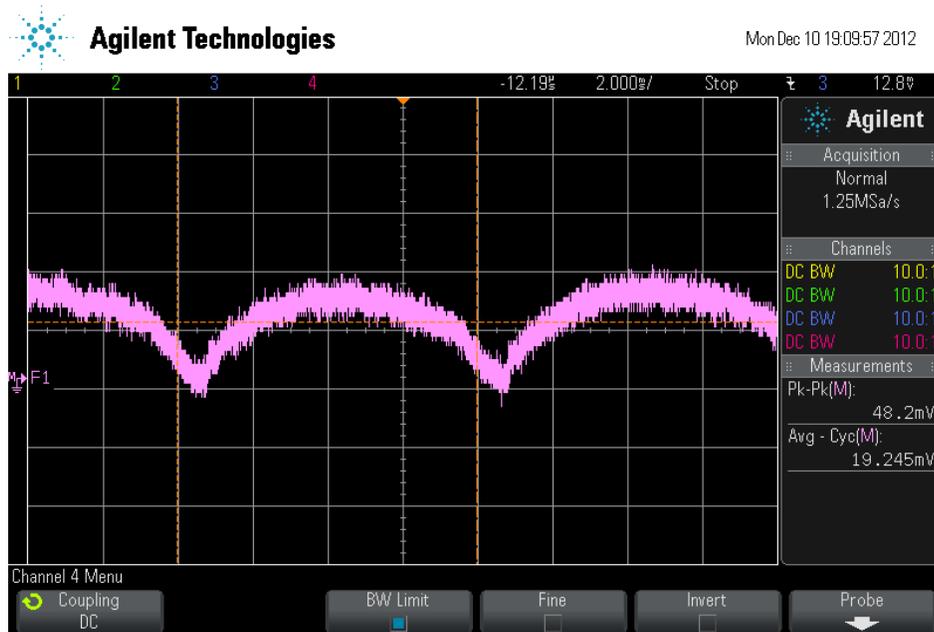


Figura 47 Señal de salida en el osciloscopio resultante

Como se puede observar en las señales resultantes en las gráficas anteriores

	JEC0,1C	JEC0,1BC	(JEC0,1C+ JEC0,1BC)*	Osciloscopio
Voltaje promedio de la señal	~15.4mV	~3.4mV	~18.8mV	19,2mV

Tabla 4 Resultados con los fotodetectores JEC0,1C y JEC0,1BC habilitados

*Medición realizada con DVM FLUKE45

El resultado anterior es consecuente con la hoja de especificación técnica de los fotodetectores, debido a que ambos cubren y responden a longitudes de onda de 254nm, pero el JEC0,1C posee mayor sensibilidad a longitudes de onda cercanas a 254nm el cual es el pico de emisión más fuerte de la lámpara de mercurio, es por esa razón que el aporte a la medición más grande, cuando de medir con estos dos fotodetectores se trate, lo tendrá la región comprendida entre 220nm-275nm es decir si se apaga el JEC0,1C la medición disminuye en un 81,9%, lo cual indica que la radiación está comprendida mayormente entre 220 275

JEC0,1BC y THOR GaP

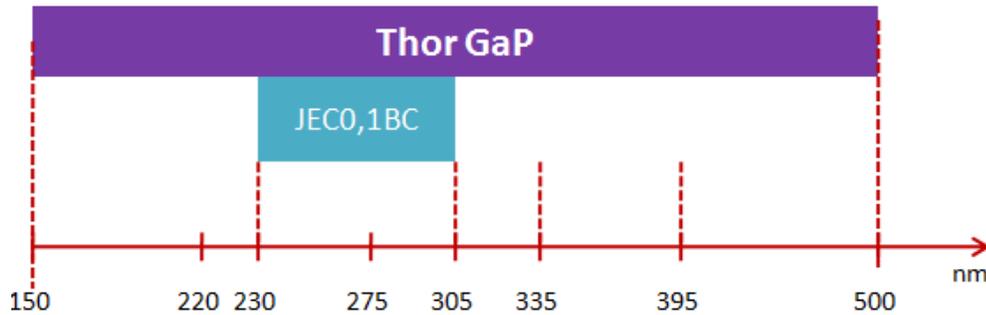


Figura 48 Habilitados fotodetectores THOR GaP y JEC0,1BC

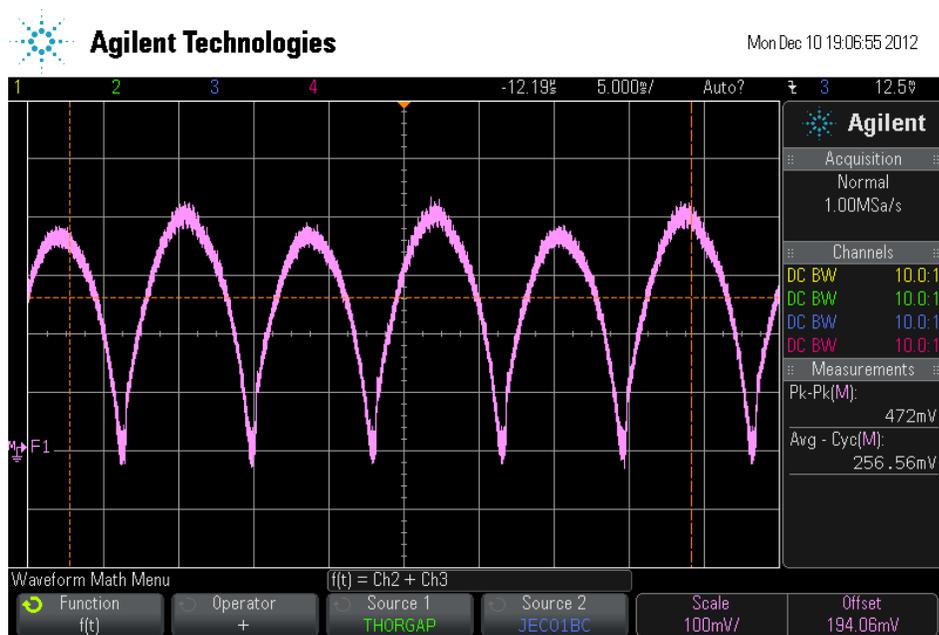


Figura 49 Superposición fotodetector Thor GaP y JEC0,1BC

	Aporte individual Thor GaP	Aporte individual JEC0,1BC	(Thor GaP+ JEC0,1BC)	Osciloscopio
Voltaje promedio de la señal	~253.4mV	~3.4mV	~256.8mV	256.6mV

Tabla 5 Variación del voltaje promedio cuando se realiza la superposición de ambas señales, medido con DVM FLUKE 45 y Osciloscopio Agilent DSOX2024

La señal eléctrica que se observa y su valor de voltaje promedio está dado en su mayoría por el fotodetector Thor GaP dado que éste componente a diferencia del detector de SiC, responde a todo el rango de UV (150nm-500), detectando de esta forma todos los picos de emisión de la lámpara.

Superposición de la señal eléctrica generada por el fotodetector JEC0.1C y Thor GaP

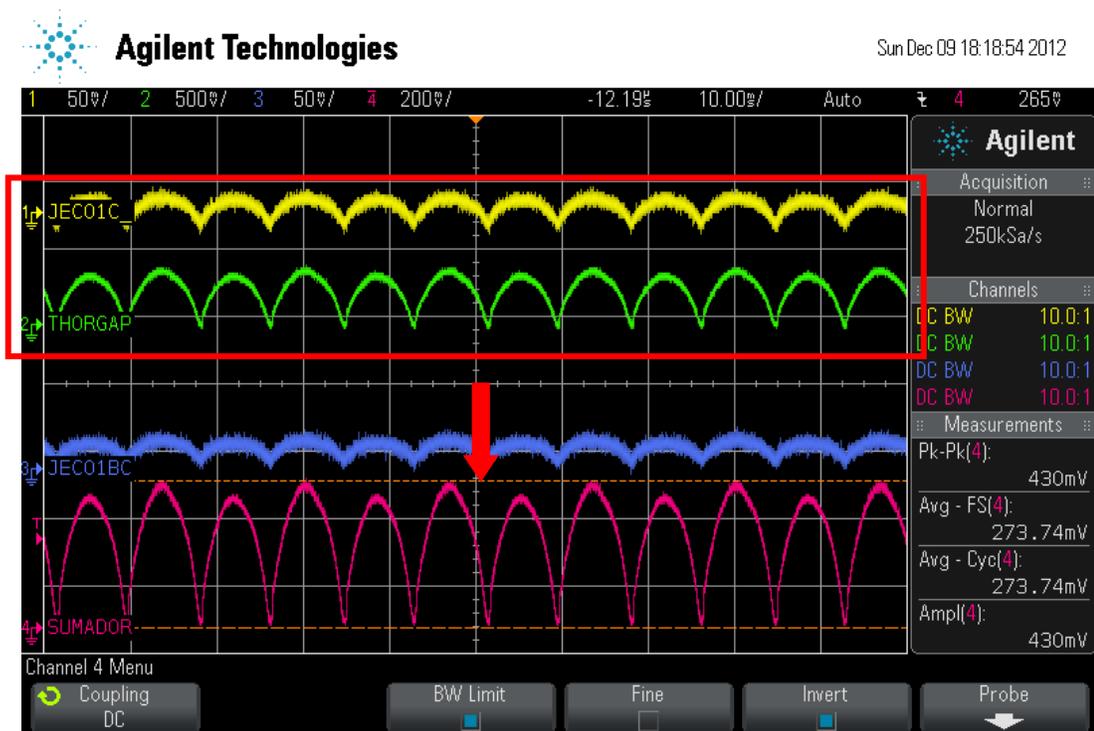


Figura 50 Superposición de la señal eléctrica generada por el fotodetector JEC0.1C y Thor GaP

	Aporte Individual Thor GaP	Aporte Individual JEC0,1C	(Thor GaP+ JEC0,1C)*	Osciloscopio
Voltaje promedio de la señal	~253.4mV	~15.4mV	~268.8Mv	273.6mV

Tabla 6 Variación del voltaje promedio cuando se realiza la superposición de ambas señales, medido con DVM FLUKE 45 y Osciloscopio Agilent DSOX

*Medición realizada con DVM FLUKE45

Al realizar ésta superposición, se obtienen valores de voltaje más relevantes, pues el fotodiodo JEC0,1C tiene una buena respuesta a la longitud de onda más fuerte de la lámpara UV.

Suma realizada utilizando la función suma del osciloscopio Fig 51:

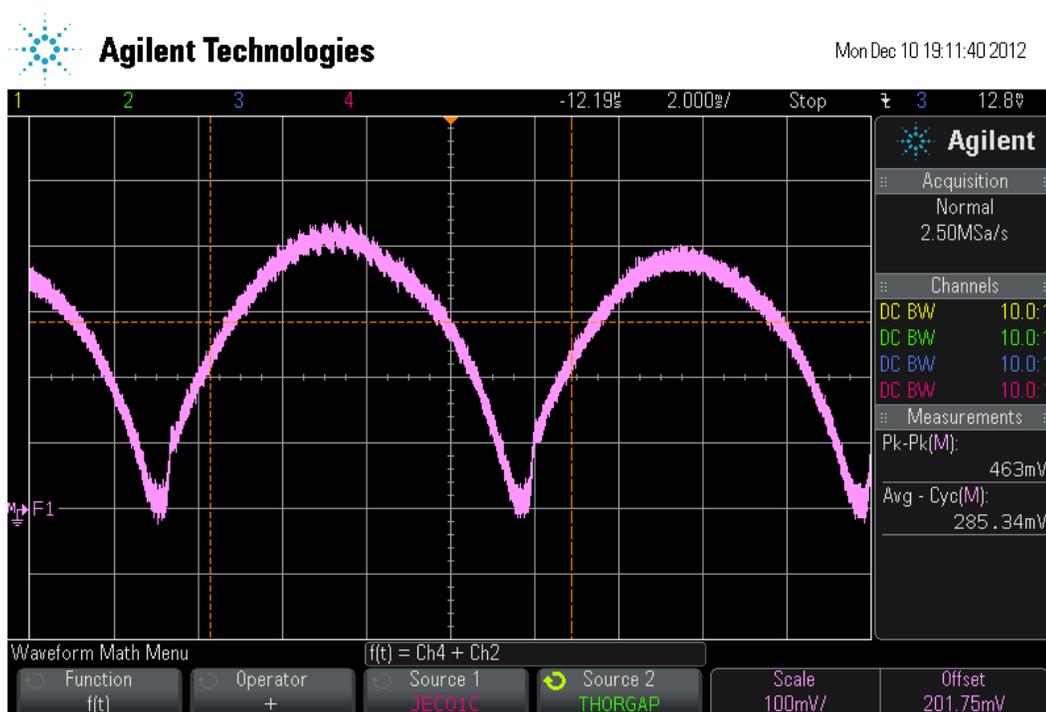


Figura 51 Superposición total

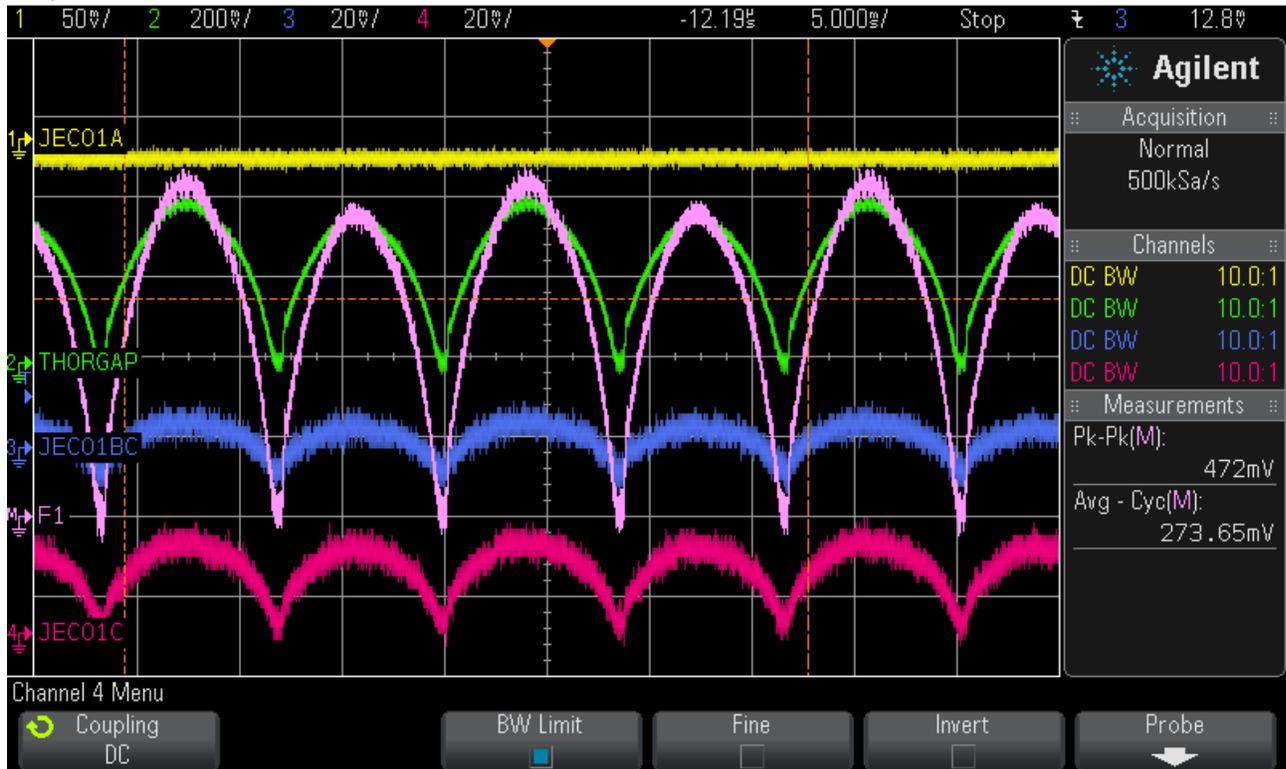


Figura 52 Superposición total

Al realizar la superposición total de las señales de voltaje entregadas por cada fotodetector del sistema, se obtiene una señal eléctrica, la cual, si se quiere determinar de dónde viene el mayor aporte de radiación UV, es posible habilitar o deshabilitar los fotodetectores, de este modo observar las variaciones de la señal resultante, lo cual, a fin de cuentas, termina dando información relevante

Como se describe en la siguiente tabla, donde “X” significa: Fotodetector habilitado

JEC01C	JEC01BC	JEC01A	Thor GaP	Resultado Voltaje Promedio
X	X	X	X	$315.93mV$
X	X	X		$19.2mV$
X	X		X	$315.93mV$
X	X			$19.2.mV$
X		X	X	$\sim 268.81mV$
X		X		$15.4mV$

X			X	$\overline{268.81\text{ mV}}$
X				$\overline{15.4\text{ mV}}$
	X	X	X	$\overline{256.81\text{ mV}}$
	X	X		$\overline{3.54\text{ mV}}$
	X		X	$\overline{256.81\text{ mV}}$
	X			$\overline{3.44\text{ mV}}$
		X	X	$\overline{253.4\text{ mV}}$
		X		$\overline{0.01\text{ mV}}$
			X	$\overline{253.4\text{ mV}}$

Tabla 7 Selección y combinación de diferentes fotodetectores para determinar los rangos de longitudes de onda donde ocurre la radiación para obtener su respectiva medición

Nota: Valores de voltaje promedio

En este apartado, se muestra el aporte de la señal eléctrica, en términos de su voltaje promedio, medido con un DVM FLUKE45, pero, además, es posible, como se observa en las imágenes, apreciar cada una de las señales en el osciloscopio y ver sus variaciones de amplitud, voltaje pico a pico, tiempos de subida y bajada, es decir, brinda una cantidad de información la cual será valiosa dependiendo de la persona que utilice el sistema, que, como principio fundamental detecta radiación UV y entrega una señal de voltaje proporcional a la radiación incidente.

Ejemplo de un posible caso uso

Si se cuenta con una lámpara de radiación UV cuyo tipo de fabricación es incierta, no se conoce la se encuentran sus picos de radiación, se somete esta lámpara al sistema detector de radiación UV

1. Se encienden los fotodetectores JEC0.1C JEC0.1BC JEC0.1A y ThorGaP

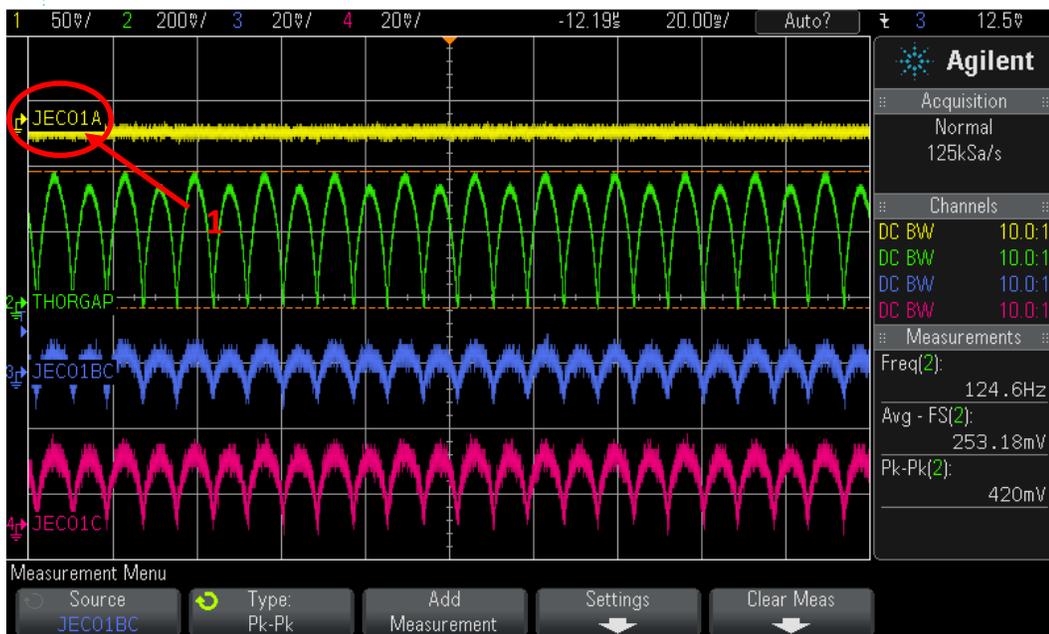


Figura 53 Se encienden los fotodetectores JEC0.1C JEC0.1BC JEC0.1A y ThorGap

2. Se observa señal de tierra 0V, en el detector JEC0.1A; Por lo tanto se concluye que la longitud de onda de lámpara que está actuando como señal de entrada al sistema detector de radiación UV, no tiene longitudes de onda comprendidas entre 335nm-395nm
3. La señal entregada por el fotodetector de GaP, permite concluir que definitivamente, se está ante la presencia de una señal cuya longitud de onda se encuentra en el rango UV
4. Se apaga el detector JEC0.1BC y Thor GaP y se observa la amplitud de la señal, voltaje promedio, valores pico a pico, del único detector que queda encendido, es decir JEC0.1C.
5. Se realiza nuevamente el paso 4, pero esta vez apagando el detector JEC0.1C
6. Se comparan los datos obtenidos en las mediciones al llevar a cabo los pasos 4 y 5. Cuanto mayor sea la amplitud de la señal y su voltaje promedio, significa que mayor es la Responsividad del dispositivo que entrega dicha señal, en este caso el fotodetector JEC0.1C, lo que permite concluir, que, sin conocer la longitud de onda de la señal de entrada de radiación UV, establecer que el pico de radiación de dicha lámpara estará ubicado entre 220nm-275nm

Ejemplo de caso de uso 2

Se tiene una señal de radiación UV, producto de la suma de los detectores JEC0.1C y JEC0.1BC

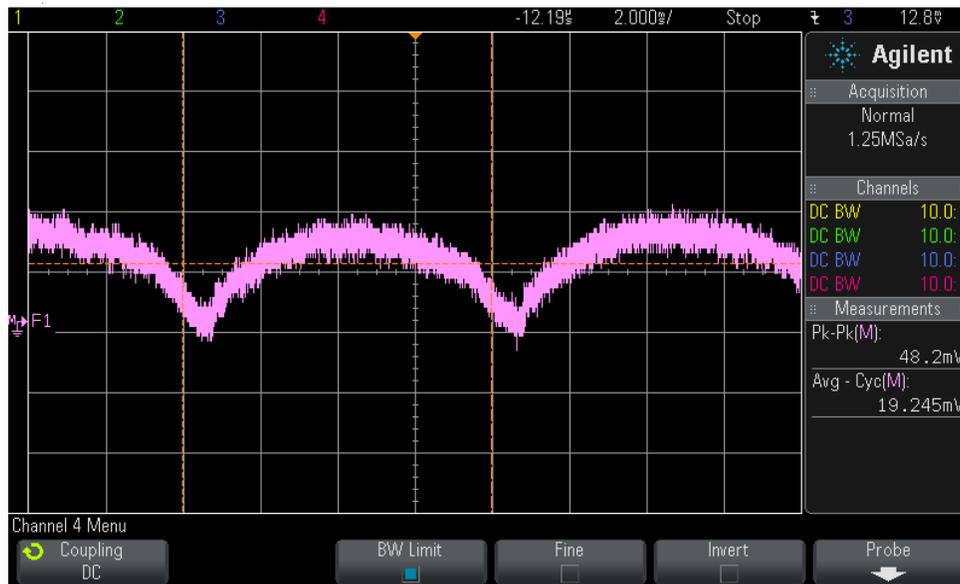


Figura 54 Suma de las señales entregadas por detectores JEC0.1C y JEC0.1BC

Voltaje promedio Jec0.1+jec0.1bc = 19.2 mV

Si se apaga JEC0.1C

Voltaje promedio de la señal = 15.4 mV

Es decir que 80,2% de voltaje promedio de la señal está presente en el rango de 220nm-275nm y el otro 19,79% en el rango 275-305nm

Conclusiones

El sistema detector de radiación UV es el producto final de un desarrollo dividido en varias etapas, empezando por la validación de circuitos simples con funciones de detección de luz en el rango visible hasta llegar al rango de detección de longitudes de onda ultravioleta. El desarrollo y estrategia utilizada para llevar a cabo el diseño del sistema, permitió cumplir con los objetivos propuestos: detectar radiación UV a diferentes bandas de frecuencias y entregar una señal de salida compatible con osciloscopio.

El sistema detector diseñado apoyará investigaciones en el proyecto de desinfección de agua por medio de radiación UV, donde es necesario observar de forma simultánea en el osciloscopio la forma de onda eléctrica que alimenta la lámpara de barrera dieléctrica y la señal eléctrica proporcional a la radiación UV que ésta emite, de este modo se logrará optimizar el diseño de convertidores estáticos que alimentan las lámparas y así maximizar la radiación ultravioleta.

La principal ventaja que ofrece el sistema diseñado en este proyecto respecto a otras soluciones disponibles en el mercado, es la posibilidad de observar en el osciloscopio la respuesta de diferentes fotodetectores, con diferentes características de responsividad, de forma simultánea, lo cual permite una caracterización más detallada de la señal eléctrica proporcional a la radiación UV incidente, pues, el hecho de observar y hacer mediciones a la señal resultante que brinda cada detector, permite clasificar dónde están los picos de radiación más fuertes y concluir sobre el rango de longitudes de onda donde se tiene el aporte de radiación más grande.

Adicionalmente, se podrían realizar posibles mejoras en el sistema tales como: incluir una fuente de alimentación propia o batería, para permitir el funcionamiento de éste sin la necesidad de una fuente de voltaje externa y reducir el número de cables y conexiones.

Cabe resaltar que gracias a la colaboración y retroalimentación recibida por parte de Magin Florez, estudiante de doctorado y primer usuario del sistema detector de radiación UV, permitió validar resultados y sentar la base para futuros desarrollos sobre el sistema detector.

Bibliografía

- [1] «OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS Catálogo de fotodetectores. Arreglos de fotodetectores página 131.,» [En línea]. Available: <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?act=showBookmark&favOid>.
- [2] «Health Physics Society Ultraviolet Radiation,» [En línea]. Available: <http://www.hps.org/hpspublications/articles/uv.html>.
- [3] E. M. M. Fernández, Desarrollo y caracterización de fotodetectores de radiación ultravioleta basados en nitruros del grupo III, Madrid, 1999.
- [4] J. R. M. y. C. R. E., «Termómetros de Radiación,» [En línea]. Available: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/RAMIREZROJASc.pdf>.
- [5] «Pirómetros,» [En línea]. Available: <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/metros/pirometros.htm>.
- [6] «TRANSDUCTORES OPTOELECTRONICOS,» [En línea]. Available: http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2_TEMA1.PDF.
- [7] «Introduction to Semiconductor Photodetectors,» [En línea]. Available: http://www.iste.co.uk/data/doc_ckcxvperdelf.pdf.
- [8] J. d. J. Zamarripa, Electrónica 1, 1998.
- [9] «Metal–semiconductor–metal Photodetectors,» [En línea]. Available: http://www.rp-photonics.com/metal_semiconductor_metal_photodetectors.html.
- [10] «Fotodetectores,» [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20426/Capitulo3.pdf>.
]
- [11] «Fotodiodo,» [En línea]. Available:
] http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2_TEMA3.PDF.
- [12] «FOTOTRANSISTORES,» [En línea]. Available:
] http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF2_archivos/UNIDAD2_TEMA4.PDF.
- [13] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, New York: Wiley, 1981.
]

- [14 [En línea]. Available: <http://www.ifw-optronics.com/files/130E04D2408/JECO,1ABC.3.e.pdf>.
]
- [15 «Transimpedance Considerations for High-Speed Amplifiers,» [En línea]. Available:
] <http://www.ti.com/lit/an/sboa122/sboa122.pdf>.
- [16 [En línea]. Available: <http://www.ifw-optronics.com/files/130E04D2408/JECO,1ABC.3.e.pdf>.
]
- [17 «Mounted Photodiodes,» [En línea]. Available:
] http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1285.
- [18 «PIN Silicon Photodiode,» [En línea]. Available: <http://www.optekinc.com/datasheets/op910w.pdf>.
]
- [19 «1.6GHz, Low-Noise, FET-Input OPERATIONAL AMPLIFIER,» [En línea]. Available:
] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa657.pdf>.
- [20 J. Graeme, Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions, McGraw-Hill, 1996.
]
- [21 «Photodiode Amplifiers Changing Light to Electricity,» [En línea]. Available:
] <http://ecee.colorado.edu/~ecen4827/hw/hw1/PhotodiodeAmplifiers.pdf>.
- [22 «Compensate Transimpedance Amplifiers Intuitively,» [En línea]. Available:
] <http://www.ti.com/lit/an/sboa055a/sboa055a.pdf> .
- [23 «Decoupling Techniques,» [En línea]. Available: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-101.pdf>.
]
- [24 «Free Evaluation Tool Description,» [En línea]. Available: <http://www.ti.com/tool/dem-opa-so-1a>.
]
- [25 «Desktop Erasers,» [En línea]. Available:
] http://www.spectroline.com/eprom/eprom_lamps_desktop_erasers.html.
- [26 «Glossary of Terms,» [En línea]. Available: <http://www.osioptoelectronics.com/technology-corner/glossary-of-terms.aspx>.
]
- [27 [En línea]. Available:
] http://www.cienciaenaccion.org/anteriores/material/trabajos_cas/id_130/emspesmall.jpg.
- [28 [En línea]. Available:
] http://www.cienciaenaccion.org/anteriores/material/trabajos_cas/id_130/emspesmall.jpg.

[29 «SM05PD7B Mounted GaP-Photodiode,» [En línea]. Available:
] <http://www.thorlabs.com/Thorcat/12000/SM05PD7B-SpecSheet.pdf>.

[30 «Modelo Ideal de un fotodiodo,» [En línea]. Available:
] <http://www.maximintegrated.com/images/appnotes/5129/5129Fig04.gif>.

Anexos

Escogencia OPA657

la línea de componentes que ofrece Texas Instruments representa una excelente alternativa para el diseño del circuito en cuestión, teniendo en cuenta su oferta de productos, se filtró la búsqueda del amplificador operacional para encontrar los componentes creados específicamente para aplicaciones de detección de luz, el resultado fue:

- OPA847
- OPA846
- OPA657

Se realizó la siguiente tabla comparativa, poniendo en ella los aspectos más importantes de cada OPA para llevar a cabo la escogencia más adecuada

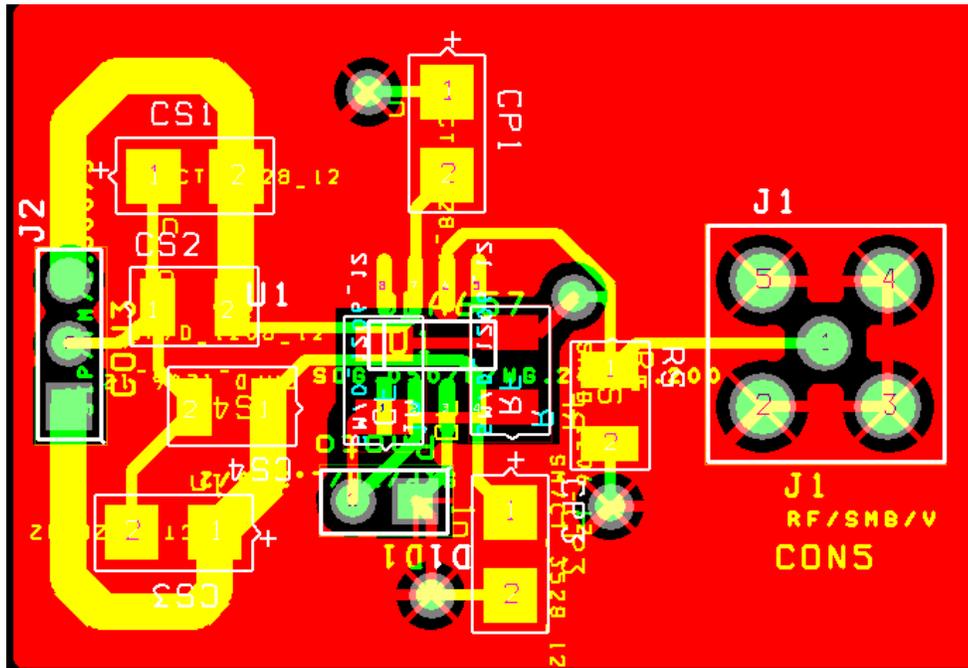
Componente	Ruido Voltaje Entrada	GBP	Tecnología	Precio
OPA 847	0.85nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	3.9GHz	Bipolar	2,25USD*
OPA 846	1.2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.75GHz	Bipolar	1.912USD*
OPA657	1.8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	1.65GHz	FET	11.25USD

Tabla 8 Tabla comparativa.

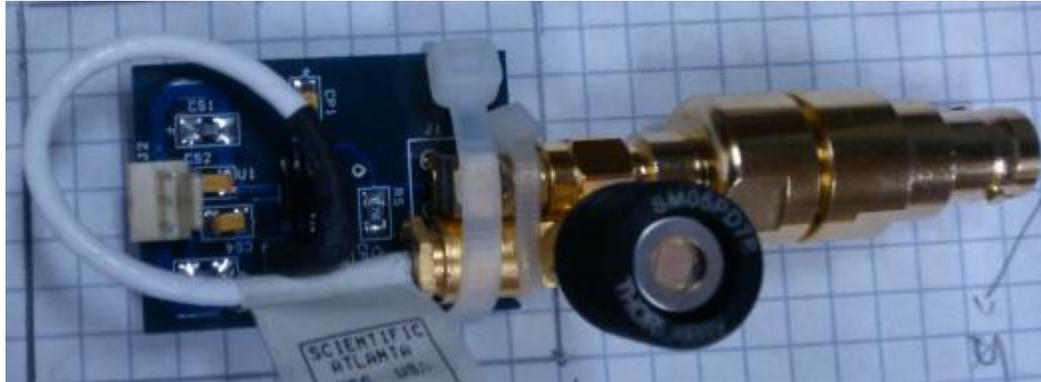
*Envío mínimo de 2,500 unidades

Con base en la tabla anterior, se escogió el OPA 657, debido a sus características de bajo ruido y sin la limitante de envíos mínimos de 2500 unidades.

Circuito Impreso amplificador de transimpedancia



Amplificador de transimpedancia con detector Thorlabs SM05D7B



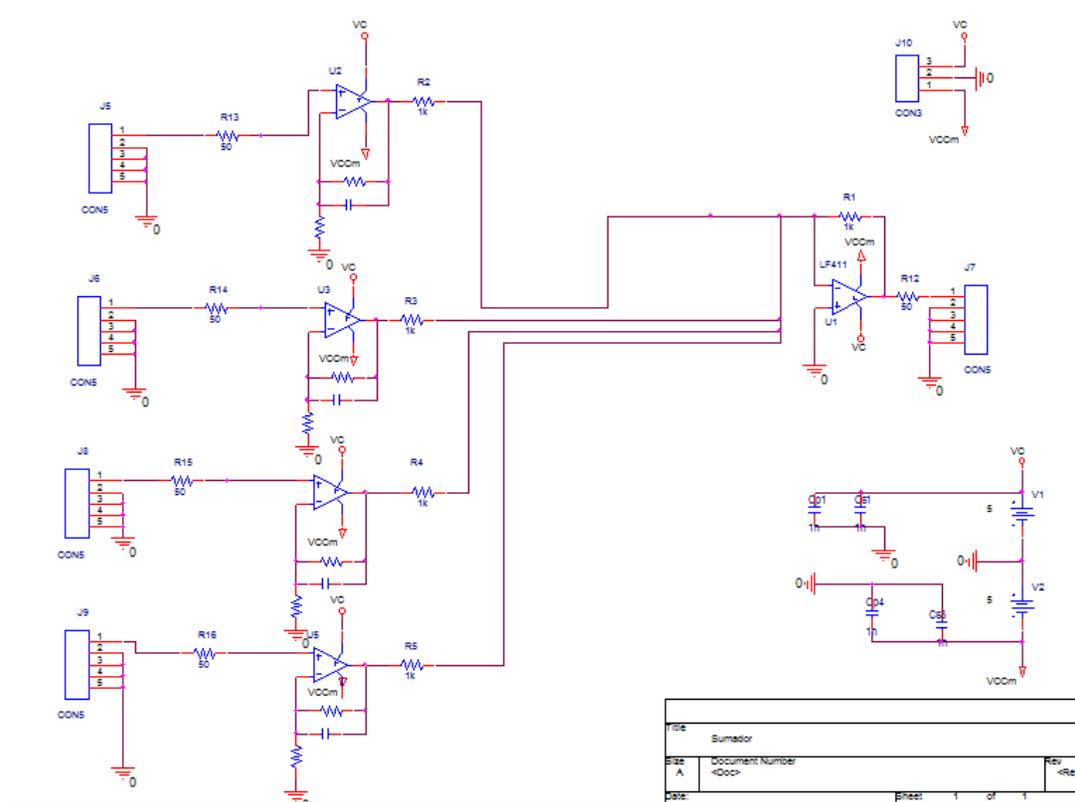
Amplificador de transimpedancia con detector JEC Silicio Carburo



Sistema detector de radiación UV



Circuito Sumador



Circuito Impreso Sumador

