

Informe Técnico

Desarrollo de material didáctico para actividades prácticas de caracterización fotoeléctrica de leds y fotodetectores

Asur Guadarrama Santana

11 de septiembre de 2024

Desarrollo Tecnológico

Financiamiento interno

Desarrollo de material didáctico para actividades prácticas de caracterización fotoeléctrica de leds y fotodetectores

Autores

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología – UNAM

Resumen

Se describe el desarrollo y metodología de actividades prácticas de caracterización de fotodetectores con Diodos Emisores de Luz (fuentes de luz) así como el acondicionamiento electrónico, necesario para el estudio y enseñanza experimental de temas de electrónica, optoelectrónica y algunas aplicaciones básicas en instrumentación. El material propuesto se conforma por una cámara oscura tubular, en cada uno de sus extremos se acopla una montura circular (tapa) en donde se encuentra un fotodetector (fotodiodo, fototransistor o fotorresistencia) y una fuente de luz (LED), las monturas en la cámara oscura son intercambiables. El objetivo de la cámara oscura es aislar al máximo la luz ambiente, con el fin de que el fotodetector reciba solamente la intensidad luminosa emitida por la fuente de luz. También se propone la implementación de circuitos de acondicionamiento electrónico básico para las fuentes de luz y los fotodetectores utilizados, con el fin de que los alumnos puedan implementar los circuitos con componentes electrónicos comerciales en una tarjeta para prototipos. Se pretende que este material didáctico sirva de apoyo en el estudio y comprensión de temas básicos de electrónica y optoelectrónica en forma práctica a nivel de licenciatura y maestría en Ingeniería Eléctrica.

Nomenclatura

A – ánodo

A – área [m^2]

AO –Amplificador Operacional

B – base

C – capacitor

C – colector

CCC – circuito de control de corriente

CdS – Sulfuro de Cadmio

CDTI – Circuito Diferencial de Transimpedancia

CDV – circuito divisor de voltaje

CDV_E – circuito divisor de voltaje de emisor

CI – circuito integrador

COCIL – circuito oscilador controlado por intensidad de luz

COT – Cámara Oscura Tubular

CST - circuito Schmitt-trigger

E- emisor

E - densidad superficial de energía recibida expresada en lux

FD – fotodiodo

FR - fotorresistencia

f_o – frecuencia de oscilación

FT – fototransistor

h_{fe} –factor de ganancia de corriente

I_b – corriente de base

I_c – corriente de colector

I_f – corriente de operación del LED

I_{fd} – corriente de ánodo del FD

I_{fmax} - corriente de operación máxima del LED

I_{led} - corriente en el LED
 I_{sc} - corriente de corto circuito en el FD
 ir – infrarrojo
 I-V – corriente-voltaje
 K – cátodo
 LED – Diodo Emisor de Luz
 LDR – Light Dependent Resistor
 R – Resistencia eléctrica
 R_c – resistencia de conversión de corriente a voltaje
 R_e – resistencia de emisor
 R_f – resistencia de retroalimentación del AO
 R_{in} – resistencia de entrada
 R_s – resistencia serie
 S – Sensibilidad [A/W]
 Si – Silicio
 S/R – relación señal a ruido
 V_{ceSat} – voltaje colector emisor de saturación
 V_f – voltaje de operación del LED
 V_{fmax} - voltaje de operación máximo del LED
 V_{in} – voltaje de entrada (alimentación)
 V_{led} – voltaje en el LED
 V_s – voltaje de salida del CDTI
 V_{smax} - voltaje de salida máximo del CDTI
 V_{so} – voltaje de salida de oscuridad del FD
 V_o – voltaje de salida
 V_{o1} – voltaje de salida del COCIL
 V_{oc} – voltaje de circuito abierto en el FD
 λ – longitud de onda

λ_d - longitud de onda dominante

λ_p - longitud de onda de pico

ÍNDICE

Nomenclatura.....	3
Introducción.....	6
1. Cámara Oscura Tubular.....	7
1.1 Acoplamiento de dispositivos optoelectrónicos con cámara oscura tubular.....	8
2. Métodos y materiales.....	9
2.1 Acondicionamiento electrónico para caracterización de dispositivos optoelectrónicos.....	9
2.1.1 Caracterización de LEDs con generador de curvas manteniendo $I_f = 5\text{ mA}$	10
2.1.2 Circuito de emisión continua para un LED.....	11
2.1.3 Caracterización de LEDs con generador de curvas I_f / V_f , (I_{led} / V_{led}).....	11
2.1.4 Circuito de control de corriente en LEDs.....	13
2.1.5 Caracterización de LEDs con COT y CCC manteniendo $I_f = 20\text{ mA}$	13
2.2 Caracterización de fotodetectores.....	15
2.2.1 Circuito diferencial de transimpedancia (CDTI).....	15
2.2.2 Caracterización de Fotodiodo FD con CDTI, COT y generador de curvas.....	16
2.2.3 Caracterización de FD con COT, CDTI y CCC manteniendo $I_f = 20\text{ mA}$	19
2.3 Caracterización de Fototransistor FT NPN con el generador de curvas y la COT.....	20
2.3.1 Circuito de acondicionamiento básico para fototransistor.....	21
2.3.2 Caracterización de Fototransistor FT con COT, CDV _E y CCC manteniendo $I_f = 20\text{ mA}$	22
2.4 Circuito de prueba para fotorresistencias.....	23
2.4.1 Caracterización de Fotorresistencia FR con COT, CDV y CCC manteniendo $I_f = 20\text{ mA}$	24
3. Resultados experimentales obtenidos con la metodología de Caracterización Fotoeléctrica.....	25
4. Aplicación de fotodetectores.....	26
4.1 Oscilador controlado por intensidad de luz.....	26
4.2 Implementación del COCIL.....	27
Conclusiones.....	30

Agradecimientos.....	30
Referencias.....	30
Anexo 1 (Diagramas esquemáticos).....	31
1. Diagramas esquemáticos de la Cámara Oscura Tubular.....	31
Anexo 2 (Antecedentes).....	32
2. Dispositivos optoelectrónicos.....	32
2.1 Fotorresistencia.....	32
2.2 Fotodiodo.....	34
2.3 Fototransistor.....	36
2.3.1 Corriente de colector frente a tensión colector–emisor y sensibilidad Espectral.....	36
2.4 Diodo Emisor de Luz (LED).....	37
2.4.1 Características técnicas.....	38
2.4.2 Potencia óptica y espectro de emisión.....	38
2.4.3 Curva característica tensión-corriente.....	39
2.5 Análisis del COCIL.....	40

Introducción

En este Informe Técnico se describe el desarrollo e implementación de actividades prácticas de caracterización fotoeléctrica de fotodetectores con fuentes de luz (LEDs), así como el acondicionamiento electrónico necesario para obtener una señal eléctrica de respuesta temporal en función de la intensidad de luz y longitud de onda, que puede ser monitorizada con un multímetro y/o un osciloscopio convencionales. Las actividades prácticas propuestas están basadas en conceptos teóricos de temas de optoelectrónica, electrónica y algunas aplicaciones básicas en instrumentación documentadas en la literatura (*Sendra, 2001*). Los conceptos teóricos ayudan a describir brevemente el funcionamiento de cada dispositivo optoelectrónico utilizado, Anexo 2. El material propuesto para implementar las actividades prácticas se conforma por una cámara oscura tubular COT, en cada uno de sus extremos se puede acoplar una montura circular (tapa) en donde se encuentra un fotodetector (fotorresistencia FR, fotodiodo FD o fototransistor FT) y una fuente de luz LED (*Guadarrama et al, 2024*). La función de la COT es la de aislar al máximo la luz ambiente que pueda incidir en la superficie fotosensitiva del fotodetector seleccionado, con el fin de que éste detecte solamente la contribución de la fuente de luz elegida. Se puede caracterizar la respuesta de diferentes fotodetectores, uno a la vez con una misma fuente de luz o con otras, dado que las monturas circulares de la cámara oscura son intercambiables. Esto permite realizar diferentes combinaciones de fuentes de luz y fotodetectores con una sola cámara oscura. De esta forma, es posible mostrar la sensibilidad máxima de un fotodetector

a una determinada intensidad de luz radiada por la fuente luminosa con un determinado rango de longitud de onda. También se proponen circuitos de acondicionamiento electrónico básico para las fuentes de luz y los fotodetectores utilizados, en donde también es posible mostrar la respuesta lineal de un fotodiodo utilizando un trazador de curvas comercial y circuitos integrados lineales comerciales (amplificadores operacionales) muy utilizados en instrumentación electrónica analógica (Guadarrama et al, 2024). Las actividades prácticas propuestas pueden ser implementadas por los alumnos armando los circuitos electrónicos básicos propuestos con componentes electrónicos comerciales en una tarjeta para prototipos junto con la COT en laboratorio. Se pretende que este material didáctico sirva de apoyo a los profesores y alumnos en la enseñanza y el aprendizaje, de forma práctica, en el estudio y comprensión de temas básicos de optoelectrónica y electrónica a nivel de licenciatura y maestría en Ingeniería Eléctrica.

1. Cámara Oscura Tubular

La cámara oscura tubular COT propuesta es de forma cilíndrica fabricada de PVC con una longitud de 134.7 mm y diámetro interno de 35 mm y diámetro externo de 42.65 mm, como se muestra en la figura 1.1.

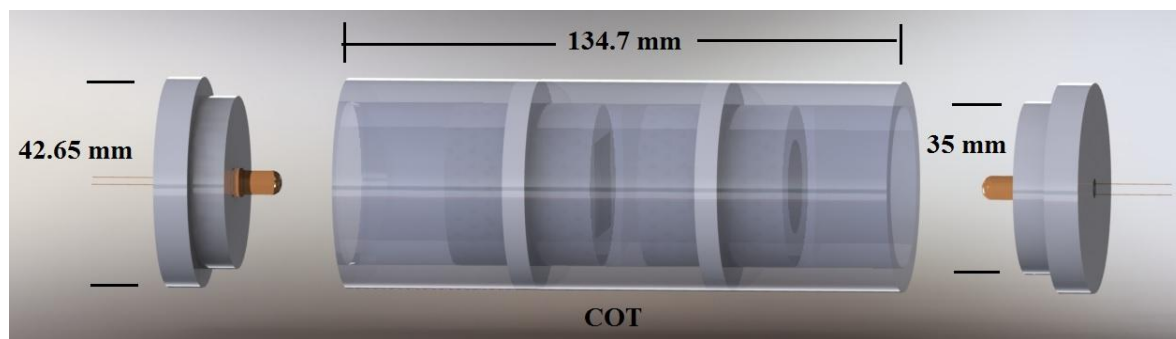


Figura 1.1. Esquema transparente de la cámara oscura tubular con monturas cilíndricas para dispositivos optoelectrónicos (Fuente: elaboración propia).

En el interior de esta se encuentran dos ventanas circulares de 19 mm de diámetro, figura A1.3 (Anexo 1), las ventanas se pueden cubrir por diferentes materiales transparentes o semitransparentes para realizar actividades prácticas relacionadas con la transmitancia y/o absorbancia de luz, si fuera el caso de interés. En el caso de las actividades prácticas propuestas las ventanas se encuentran libres y permiten el paso de la luz proveniente de la fuente de un LED con el fin de que el fotodetector elegido reciba al máximo solamente la luz emitida (Guadarrama et al, 2024). En cada extremo de la cámara oscura se acoplaron las monturas circulares que sirvieron como soporte para fijar los diferentes dispositivos optoelectrónicos (fuentes

de luz LED y fotodetectores) y además bloquean la mayor parte de la luz ambiente, como se muestra en la figura 1.2.

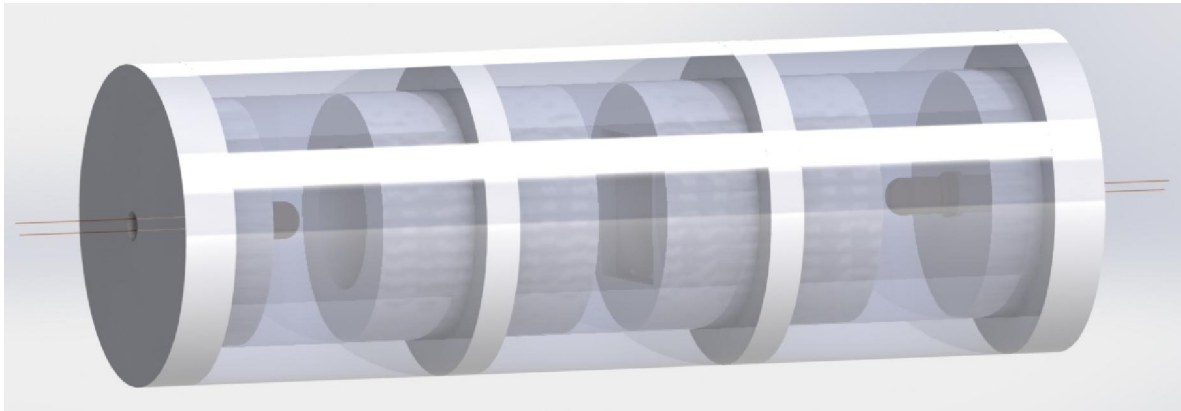


Figura 1.2. Vista transparente de la cámara oscura tubular con las monturas de los dispositivos optoelectrónicos colocadas en cada extremo (Fuente: elaboración propia).

1.1 Acoplamiento de dispositivos optoelectrónicos con cámara oscura tubular

Los dispositivos optoelectrónicos utilizados para realizar su caracterización se acoplaron en monturas circulares en cada extremo (tapas), figura 1.3(a), y estas a su vez se intercambiaron con diferentes dispositivos con la cámara oscura tubular, figura 1.3(b), quedando uno en cada extremo a una separación constante, como se muestra en la figura 1.3(c).

De esta forma se aseguró que los fotodetectores quedarán aislados casi completamente de la luz ambiente y por consiguiente sólo recibieron iluminación de la fuente de luz elegida.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.3. Cámara oscura tubular COT. a) Partes que forman la COT, b) LED, Fotodetector FD, Fotorresistencia FR y fototransistor FT acoplados en las monturas laterales de la COT y c) COT con el LED y el fotodetector montados en cada uno de sus extremos (Fuente: elaboración propia).

2. Métodos y Materiales

2.1 Acondicionamiento electrónico para caracterización de dispositivos optoelectrónicos

Para realizar la caracterización de los dispositivos optoelectrónicos se implementaron circuitos electrónicos de acondicionamiento básico para cada uno de forma que en un extremo de la cámara oscura tubular se acopló un LED y del otro extremo un fotodetector, figura 1.3(c). De esta forma, se implementaron diferentes combinaciones con fotodetectores (fotorresistencia FR, fotodiodo FD, fototransistor FT NPN) con LEDs de diferente longitud de onda (color), figura 1.3(b). Junto con una metodología de medición propuesta se realizó el registro de la

respuesta del fotodetector utilizado con diferentes intensidades y longitudes de onda sin contribución de luz ambiental. La electrónica de acondicionamiento electrónico se implementó en tarjetas para prototipos con el fin de mostrar al profesor, instructor o alumno cómo se realizaron las conexiones necesarias para efectuar la caracterización de los dispositivos fotoelectrónicos utilizados y el registro de los datos necesarios para su análisis, estudio y conclusiones obtenidas (Guadarrama et al, 2024).

2.1.1 Caracterización de LEDs con generador de curvas manteniendo $I_f = 5$ mA.

Se caracterizaron 9 LEDs con diferente longitud de onda, incluyendo un LED RGB (rojo, verde, azul) HV-5RGBXX, utilizando un trazador de curvas comercial para dispositivos electrónicos semiconductores PEAK atlas DCA Pro, modelo DCA75, figura 2.1.

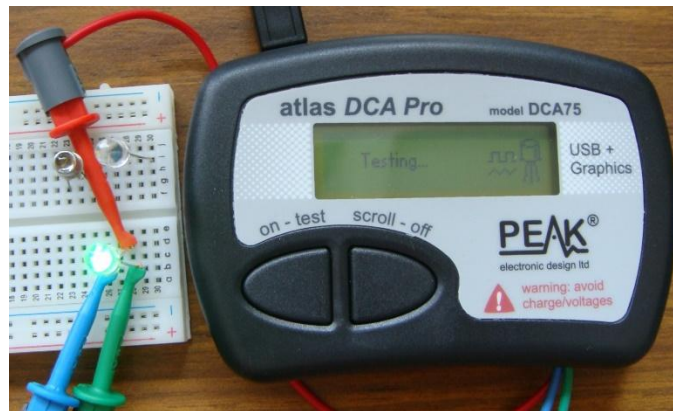


Figura 2.1. Prueba de LEDs utilizando un trazador de curvas comercial para dispositivos electrónicos semiconductores de la marca PEAK (Guadarrama et al, 2024).

Tabla 2.1. Valores de V_f en función de $I_f = 5$ mA (Guadarrama et al, 2024).

LED	V_f [V]	I_f [mA]
Infrarrojo	1.113	5
Rojo	1.696	5
Ambar	1.943	5
Amarillo	1.927	5
Verde	2.035	5
Blanco	2.691	5
Azul	2.713	5
Violeta	2.987	5
LED RGB		
Rojo	1.925	5
Verde	2.484	5
Azul	2.730	5

Se obtuvieron los voltajes de operación V_f en función de una corriente de operación $I_f = 5$ mA, ambos del LED, como se muestra en la tabla 2.1, (Guadarrama et al, 2024).

2.1.2 Circuito de emisión continua para un LED

“Primero se tiene que tomar en cuenta la corriente de operación que circula por el LED I_{led} para no dañarlo y la tensión V_{led} que caerá en bornes del dispositivo para la corriente deseada, estos valores se pueden determinar por medio de su curva corriente-tensión I-V. Para limitar la corriente I_{led} que pasará por un LED de forma rápida y sin fijarnos en la curva I-V el mejor sistema con emisión continua será con el circuito que se muestra en la figura 2.2.

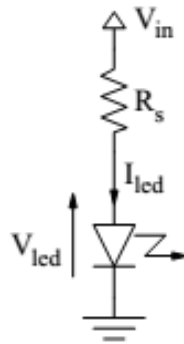


Figura 2.2. Circuito para limitar la corriente I_{led} en forma continua (Sendra, 2001).

Para determinar el valor de la resistencia serie R_s aplicaremos la fórmula siguiente,

$$R_s = \frac{V_{in} - V_{led}}{I_{led}} \quad (2.1)$$

Recordemos que V_{led} no es 0.7 V como en los diodos rectificadores sino que depende de la longitud de onda de emisión y que por tanto deberemos mirar las hojas de datos técnicos, de todas formas muchas veces tan sólo deseamos saber si un LED funciona o no, para ello unos valores siempre válidos serían: $V_{in} = 6$ V y $R_s = 220 \Omega$, (Sendra, 2001).

2.1.3 Caracterización de LEDs con generador de curvas I_f / V_f , (I_{led} / V_{led})

Con el trazador de curvas junto con un software propio de la marca PEAK y por medio de una computadora, se obtuvieron las curvas de corriente del LED I_f en función del voltaje en directa V_f , entre el ánodo A y cátodo K para ocho diferentes LEDs con su respectiva longitud de onda, como se muestra en la figura 2.3. Se puede observar en las gráficas que para alcanzar una corriente de operación máxima I_{fmax} de un LED que emite en una longitud de onda predominante, su voltaje en directa V_{fmax} aumenta conforme disminuye la longitud de onda de emisión a excepción de un LED que emita luz blanca.

Para el caso práctico de caracterización de fotodetectores propuesto se utilizaron LEDs con longitudes de onda en el infrarrojo (ir), rojo, verde, azul y luz blanca. En la tabla 2.1 se muestran los valores de las corrientes de operación máximas I_{fmax} en función de los voltajes de operación máximos V_{fmax} para cada LED, entre 11.04 mA y 11.63 mA, obtenidos de las curvas correspondientes de I_f / V_f de la figura 2.3.

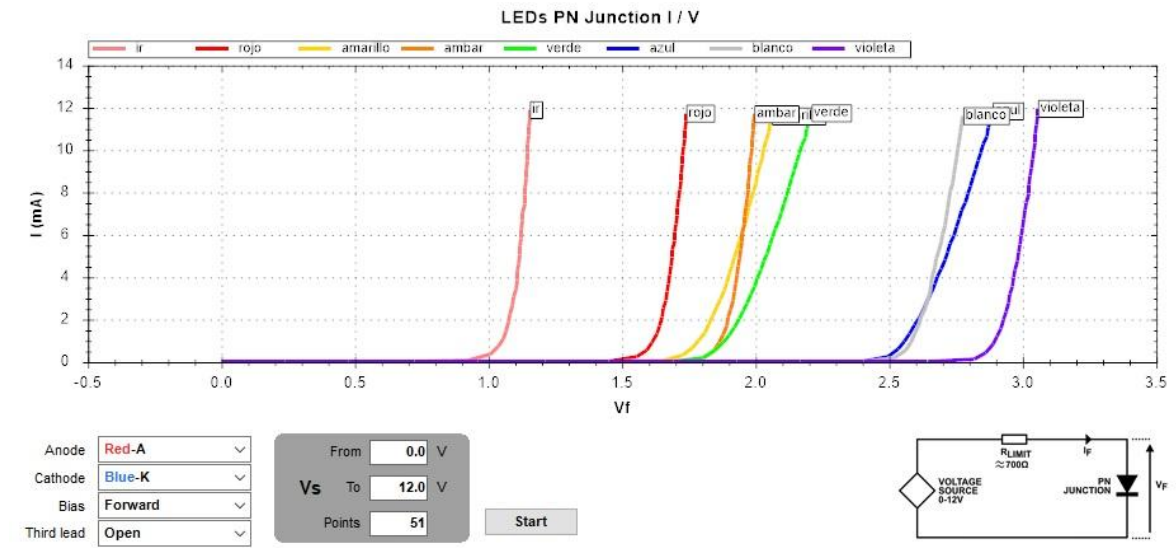


Figura 2.3. Gráficas de I_f / V_f para LEDs con diferente longitud de onda correspondiente a cada color mostrado, desde uno en el infrarrojo cercano (ir) hasta otro en el violeta. Abajo de las graficas se muestran los valores mínimo y máximo de voltaje utilizados para realizar un barrido de voltaje con el circuito electrónico que utiliza el generador de curvas, obtenidas con el software de PEAK (Guadarrama et al, 2024).

Tabla 2.2. Valores de voltaje de operación V_{fmax} para corrientes de operación I_{fmax} para cada LED (Guadarrama et al, 2024).

LED	V_{fmax} [V]	I_{fmax} [mA]
infrarrojo	1.155	11.5
rojo	2.039	11.66
Verde	2.72	11.72
Azul	2.88	11.04
blanco	2.77	11.63

En este caso la corriente I_f está determinada por el rango de voltaje de barrido V_f del generador de curvas y como se mencionó anteriormente se muestra que el voltaje en directa V_{fmax} aumenta cuando disminuye la longitud de onda λ del LED, como se ve también en las curvas de la figura A2.8 del Anexo 2. Estos resultados también se confirman comparando los valores obtenidos en la tabla 2.1 con los de la tabla 2.2.

2.1.4 Circuito de control de corriente en LEDs

“En el circuito anterior de la figura 2.2, no se controla la corriente en el LED tan sólo se limita, si deseamos que la corriente que atraviese el LED sea proporcional a la tensión con la que deseamos excitarlo podemos llevarlo a cabo con el circuito de la figura 2.4.

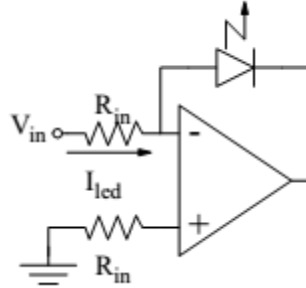


Figura 2.4. Circuito para controlar la corriente I_{led} en función de V_{in} (Sendra, 2001).

En este caso la corriente que excita al LED se obtiene con la siguiente expresión,

$$I_{led} = I_f = \frac{V_{in}}{R_{in}} \quad (2.2)$$

El circuito de control de corriente CCC es muy simple gracias al cortocircuito virtual, pero tiene un problema y es que si V_{in} es negativa obligaremos a pasar corriente en inversa por el LED lo que no es aconsejable”, (Sendra, 2001).

2.1.5 Caracterización de LEDs con COT y CCC manteniendo $I_f = 20 \text{ mA}$.

En datos técnicos de fabricantes de LEDs de 5 mm se especifica por lo general una corriente de operación $I_{led} = I_f = 20 \text{ mA}$, este valor de corriente se mantuvo constante en cada medición. El voltaje V_f se ajustó hasta alcanzar I_f para cada longitud de onda de emisión del LED correspondiente. Se implementó el circuito de control de corriente CCC descrito anteriormente en la figura 2.4, utilizando un amplificador operacional AO TL072 con alimentación $\pm V_{cc}$ de $\pm 5\text{V}$ a $\pm 6\text{V}$ y resistencias $R_{in} = 110 \Omega$. En cada caso, el voltaje V_{in} aplicado al LED varió en el rango mencionado hasta alcanzar la corriente de operación $I_f = 20 \text{ mA}$, monitorizada con un multímetro digital. En este caso y solo con el fin de utilizar una fuente de alimentación bipolar variable, se propuso que $V_{in} = +V_{cc}$ por lo que el voltaje bipolar $\pm V_{cc}$ de alimentación del AO TL072 también varió para cada LED en el rango de voltaje mencionado. Con la metodología descrita se obtuvieron los voltajes de operación V_f en función de una corriente de operación $I_f = 20 \text{ mA}$ de diferentes LEDs comerciales con diferente longitud de onda de emisión, incluyendo un LED RGB HV-5RGBXX el cual se utilizó para caracterizar la respuesta de diferentes fotodetectores, figura 2.5. Los voltajes de operación se muestran en la tabla 2.3. Como se puede observar para una

corriente de operación $I_f = 20$ mA el voltaje de operación V_f varía dependiendo de la longitud de onda de emisión del LED, como se mencionó anteriormente. Esta metodología de caracterización eléctrica puede ser conveniente cuando se utilizan LEDs comerciales que no cuentan con información técnica del fabricante, como es en este caso para algunos de los LEDs utilizados, (Guadarrama et al, 2024).

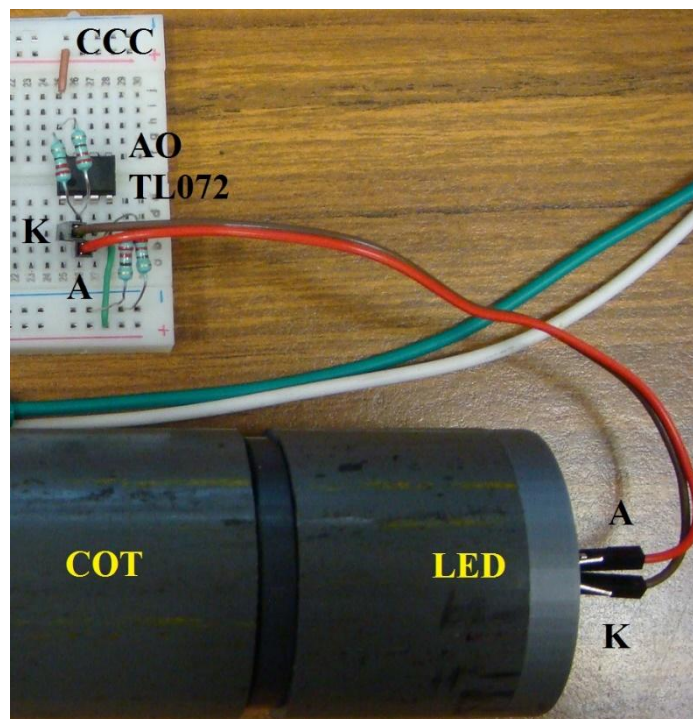


Figura 2.5. Arreglo experimental para obtener los voltajes de operación V_f en función de la corriente de operación $I_f = 20$ mA de LEDs de diferente longitud de onda con el CCC (Fuente: elaboración propia).

Tabla 2.3. Valores de voltaje de operación V_f en función de la corriente de operación $I_f = 20$ mA para diferentes LEDs comerciales con su respectiva longitud de onda de emisión (color), (Guadarrama et al, 2024).

LED	V_{in} [V]	V_f [V]	I_f [mA]	R_{in} [Ω]
Infrarrojo	5.0	1.18	20	110
Rojo	5.3	1.84	20	110
Ambar	5.4	2.02	20	110
Amarillo	5.5	2.27	20	110
Verde	5.6	2.38	20	110
Blanco	5.8	2.94	19.8	110
Azul	5.9	3.10	19.9	110
Violeta	6.0	3.23	20.1	110
LED RGB				
Rojo	5.5	2.19	20.1	110
Verde	5.9	3.02	20.1	110
Azul	5.9	3.01	19.9	110

2.2 Caracterización de fotodetectores

La caracterización de fotodetectores se realizó con LEDs de diferente longitud de onda de emisión, con el fin de registrar la respuesta optoeléctrica a cada una de estas. Se utilizó un fotodiodo FD PIN, un fototransistor FT NPN y una fotorresistencia FR acoplados en cada extremo de una cámara oscura tubular COT, figura 1.3(c), con el fin de aislar la luz ambiente y obtener la respuesta eléctrica del fotodetector, con el LED correspondiente, por medio de un circuito de acondicionamiento electrónico para cada caso.

2.2.1 Circuito diferencial de transimpedancia (CDTI)

En la figura 2.6 se representa el circuito de acondicionamiento electrónico conocido como convertidor de corriente a voltaje (transimpedancia) o simplemente amplificador de corriente con un FD y un amplificador operacional AO. Las aplicaciones de este circuito comúnmente son para el acondicionamiento de señales luminosas utilizando fotodiodos FDs. El AO y el FD poseen cualidades diferenciales que se combinan para rechazar efectos de ruido de acoplamiento.

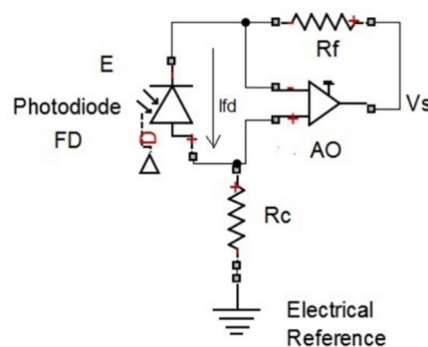


Figura 2.6. Circuito diferencial de transimpedancia, CDTI (Fuente: elaboración propia).

Las entradas de polaridad opuesta del AO superan cualquier señal diferencial aplicada, de las señales de modo común. El FD produce una señal diferencial en forma de corrientes de polaridad opuesta, como si fueran dos diodos conectados en paralelo con polaridad opuesta. La corriente que fluye hacia la terminal de un FD fluye fuera del otro, produciendo una señal de corriente diferencial. Aplicando esta señal a las dos entradas del AO se realiza la conversión de corriente a voltaje de entrada diferencial. Aquí una segunda resistencia R_c de conversión de corriente a voltaje y la conexión del FD en paralelo con las entradas diferenciales del AO diferencian este circuito de un circuito electrónico de transimpedancia básico. Estas diferencias sencillas producen fácilmente cambios anticipados en la ganancia y el offset de dc en el circuito, pero cambios menos obvios en el desempeño del ruido. Primero, los cambios del CDTI incrementan la ganancia de corriente a voltaje automáticamente y proveen una reducción del offset de dc. En el circuito de la figura 2.6, la resistencia añadida R_c desarrolla una segunda señal de voltaje desde la

corriente de ánodo I_{fd} del FD. Esta señal $I_{fd}(R_c)$ se añade a la señal normal $I_{fd}(R_f)$ incrementando la señal de voltaje de salida V_s como,

$$V_s = I_{fd}(R_f + R_c) \quad (2.3)$$

La resistencia R_c además ocupa la posición de la resistencia de compensación de offset. Haciendo las resistencias iguales en el circuito se cancelan los efectos de offset con las dos entradas de corriente del AO. Además, haciendo $R_f = R_c$ se balancea el circuito para óptimo rechazo de interferencia de ruido, (Graeme, 1996).

2.2.2 Caracterización de Fotodiodo FD con CDTI, COT y generador de curvas

La caracterización de la respuesta fotoeléctrica se realizó con un fotodiodo PIN BPV10 de Vishay Semiconductors. La señal fotoeléctrica generada por el FD se acondicionó por medio de un circuito electrónico diferencial de transimpedancia CDTI, descrito en la figura 2.6, el cual se implemento con un AO TL072 y resistencias $R_c = R_f = 100 \text{ k}\Omega$. Las ventajas principales de este circuito son la reducción de ruido y la linealización de la señal de voltaje de salida en función de la corriente fotoeléctrica generada por el FD, $V_s(I_{fd})$. El LED se montó en uno de los extremos de la COT y en el otro extremo se montó el FD, como se muestra en el diagrama esquemático de la figura 2.7.

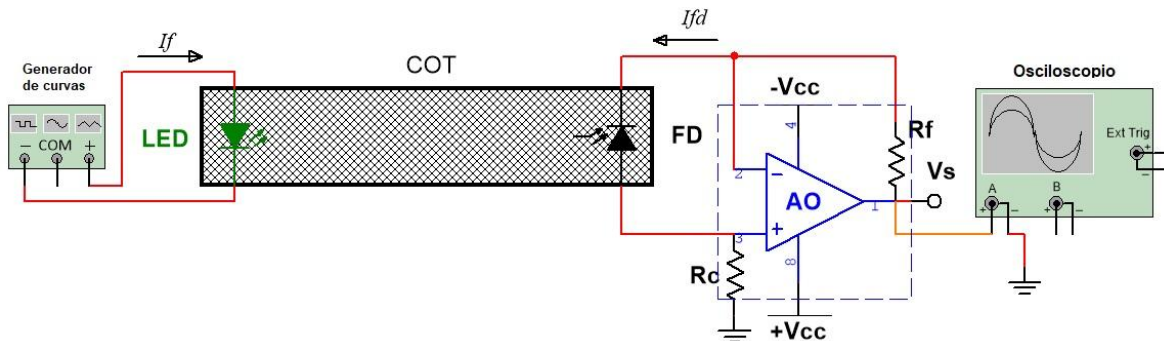


Figura 2.7. Diagrama esquemático de conexiones del generador de curvas con el LED, COT y FD para registrar su voltaje de salida $V_s(t)$ por medio de un osciloscopio (Fuente: elaboración propia).

Primero se midió el voltaje de salida de oscuridad V_{so} , manteniendo el FD PIN en total oscuridad en la COT, de esta forma se obtuvo $V_{so} = 2.7 \text{ mV}$ a la salida del CDTI. Este voltaje se midió con un multímetro digital y representa el promedio del voltaje de ruido en oscuridad característico del FD. Después se aplicó la metodología descrita en la figura 2.3, para obtener las curvas I_f / V_f de cinco LEDs de diferente longitud de onda de emisión alimentados por medio del generador de curvas PEAK, con el fin de detectar las señales de voltaje fotoeléctricas $V_s(I_{fd})$ con el FD PIN para cada LED utilizado y realizar el registro de datos en una computadora. Las señales de voltaje $V_s(t)$ se monitorizaron en tiempo real con un osciloscopio, como se muestra en el arreglo experimental de la figura 2.8.

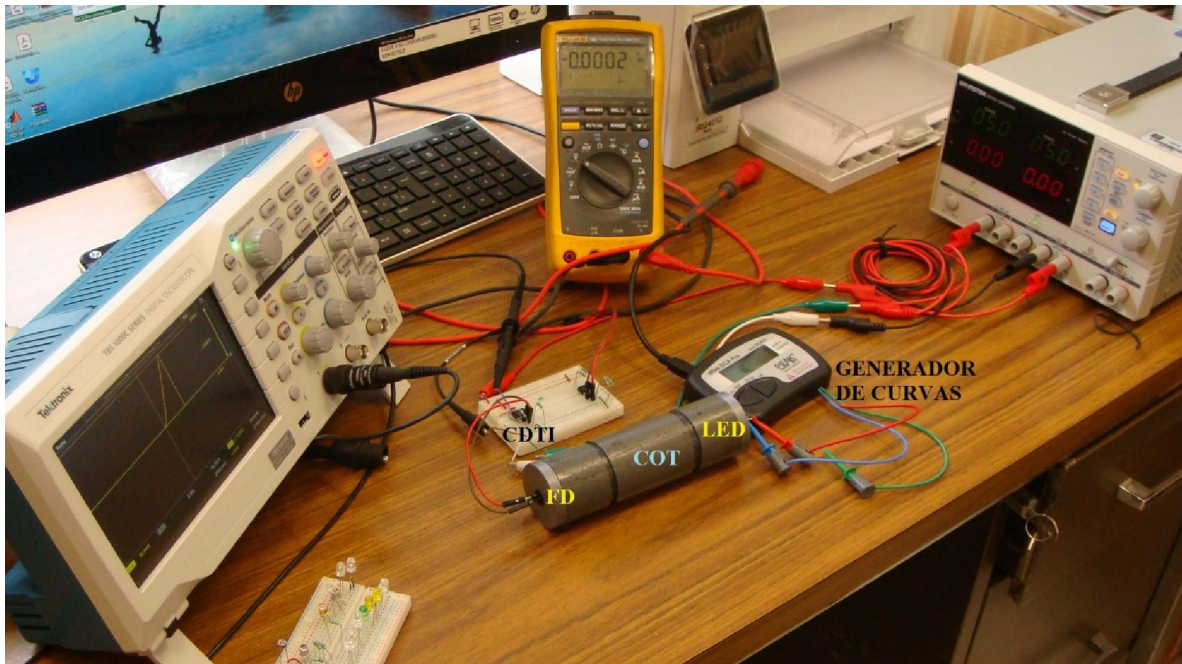
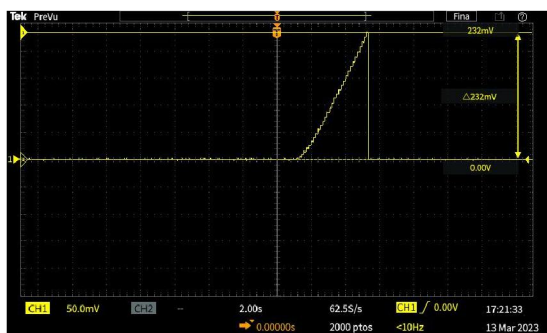
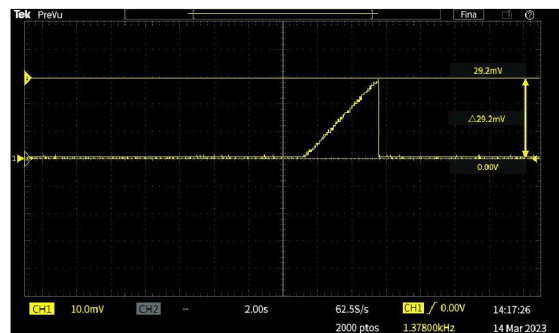


Figura 2.8. Arreglo experimental para caracterizar la respuesta fotoeléctrica de un FD PIN con un LED alimentado por medio de un generador de curvas de la marca PEAK. La señal fotoeléctrica de voltaje de salida $V_s(t)$ de un circuito diferencial de transimpedancia CDTI se monitorizó en tiempo real con un osciloscopio (Fuente: elaboración propia).

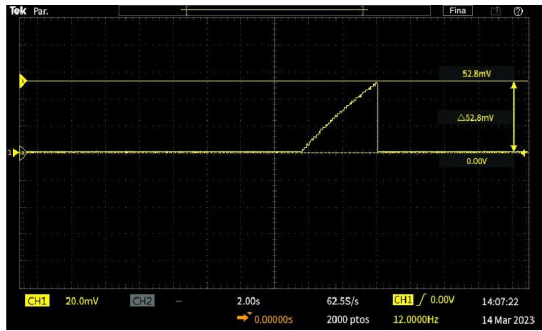
Las respuestas fotoeléctricas del FD PIN se monitorizaron en función de cinco LEDs con longitudes de onda predominantes en el infrarojo cercano, rojo, verde, azul y blanco. Se obtuvieron los voltajes de salida $V_s(t)$ del CDTI en función de la intensidad luminosa emitida por cada LED con los voltajes y corrientes de operación de las curvas I_f / V_f mostrados en la figura 2.3 y la tabla 2.2. En la figura 2.9 se muestran los oscilogramas obtenidos de $V_s(t)$ para cada LED.



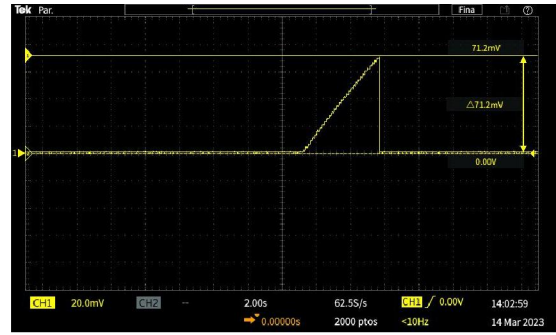
(a)



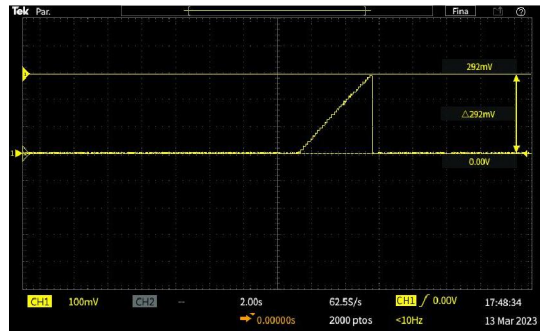
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.9. Oscilogramas del voltaje de salida $V_s(t)$ del CDTI para diferentes LEDs emitiendo a su respectiva longitud de onda predominante λ , a) infrarrojo cercano, b) rojo, c) verde, d) azul y e) blanco (Fuente: elaboración propia).

En las curvas obtenidas de la figura 2.9 se puede observar la respuesta con tendencia lineal y la amplitud máxima de $V_{smax}(t)$ que se obtiene a la salida del CDTI para cada LED con su respectiva longitud de onda predominante de emisión λ .

Tabla 2.4. Voltajes de salida máximos V_{smax} del CDTI para cada LED (Fuente: elaboración propia).

LED	λ [nm] predominante	$V_{smax}(t)$ [mV]
(a) infrarrojo	cercano	232
(b) rojo	632	29.2
(c) Verde	520	52.8
(d) Azul	470	71.2
(e) blanco	-	292

En la tabla 2.4 se muestran los valores máximos de $V_{smax}(t)$ en función de la intensidad luminosa máxima emitida por cada LED, la sensibilidad en el rango de longitudes de onda de recepción del FD PIN, la fotocorriente I_{fd} generada por el fotodetector y la ganancia del CDTI. También se puede observar una buena relación señal a ruido S/R en las curvas de $V_s(t)$ obtenidas, mostrando que la COT junto con

el CDTI ayudan a reducir el ruido de las señales optoelectrónicas debido al aislamiento de la iluminación ambiental.

2.2.3 Caracterización de FD con COT, CDTI y CCC manteniendo $I_f = 20 \text{ mA}$.

Se realizó la caracterización de un FD con diferentes LEDs con su respectiva longitud de onda para obtener el voltaje de salida V_o del CDTI. Se ajustó la corriente de operación $I_f = 20 \text{ mA}$ con $V_e = V_{in} = +V_{cc}$ de acuerdo a los datos de la tabla 2.3 correspondiente al LED utilizado con el circuito de control de corriente CCC, descrito en la figura 2.4, e implementado en el arreglo experimental mostrado en la figura 2.5. Para realizar las mediciones se propuso el diagrama esquemático del circuito electrónico completo que se muestra en la figura 2.10.

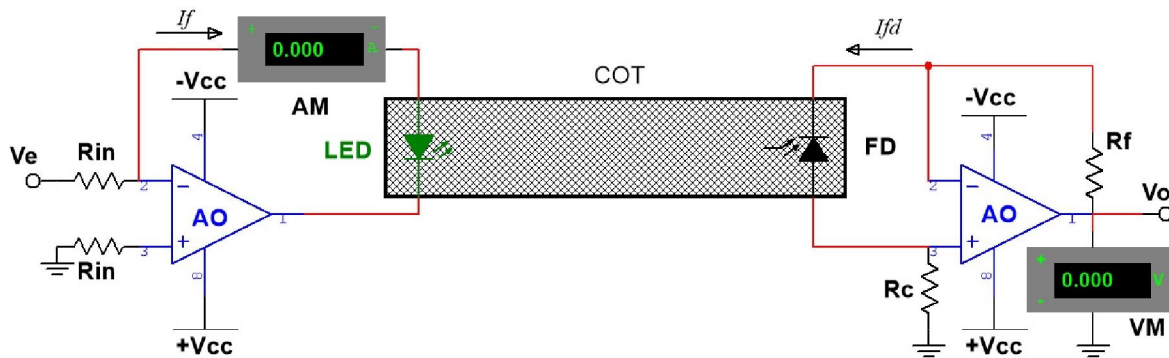


Figura 2.10. Diagrama esquemático de conexiones para realizar la caracterización fotoeléctrica de LEDs por medio de un FD dentro de la COT. (Guadarrama et al, 2024).

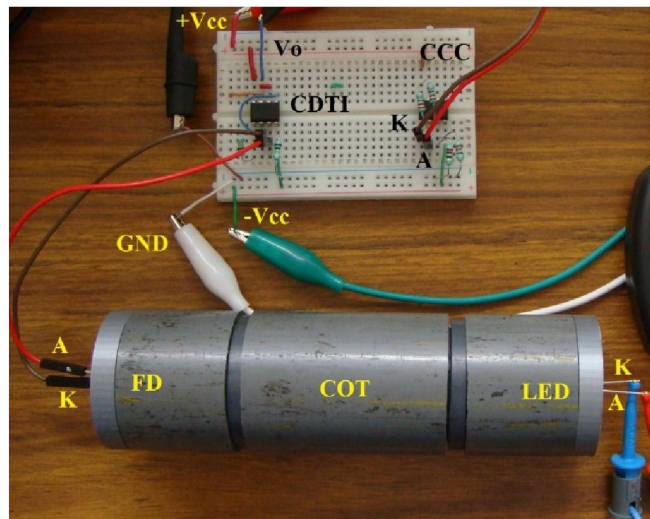


Figura 2.11. Arreglo experimental para caracterizar la respuesta de un FD con LEDs de diferente longitud de onda λ y con una corriente de operación constante $I_f = 20 \text{ mA}$ (Fuente: elaboración propia).

Con el FD utilizado anteriormente junto con el CDTI, el CCC y la COT se implementó el arreglo experimental de la figura 2.11, con el fin de obtener mediciones de $V_o(I_f)$ con un multímetro digital VM, (Guadarrama et al, 2024).

Este esquema de arreglo experimental y metodología de caracterización optoelectrónica se aplicó para un fototransistor FT NPN y una fotorresistencia FR, sustituyéndolos por el FD; cada uno con su respectivo circuito de acondicionamiento electrónico para medir su voltaje de salida en función de la intensidad luminosa que recibieron.

2.3 Caracterización de Fototransistor FT NPN con el generador de curvas y la COT

Se utilizó un fototransistor FT NPN de tres pines (colector, base, emisor), el cual se probó como un transistor BJT normal con el generador de curvas PEAK y con la COT en oscuridad con el fin de aislar la luz ambiente, como se muestra en la figura 2.12.



Figura 2.12. Arreglo experimental para caracterizar el FT en oscuridad con la COT y con el generador de curvas (Fuente: elaboración propia).

Se obtuvieron los siguientes datos de operación del FT NPN utilizado:

- Factor de ganancia de corriente $h_{fe} = 440$ con corriente de base $I_b = 5$ mA
- Voltaje colector emisor de saturación $V_{ceSat} = 0.096$ V con corriente de colector $I_c = 5$ mA e $I_b = 1$ mA

Por medio de una computadora y un software propio de la marca PEAK se obtuvieron las curvas I_c / V_{ce} en oscuridad y en función de la fuente de corriente de base del generador de curvas, como se muestra en la figura 2.13.

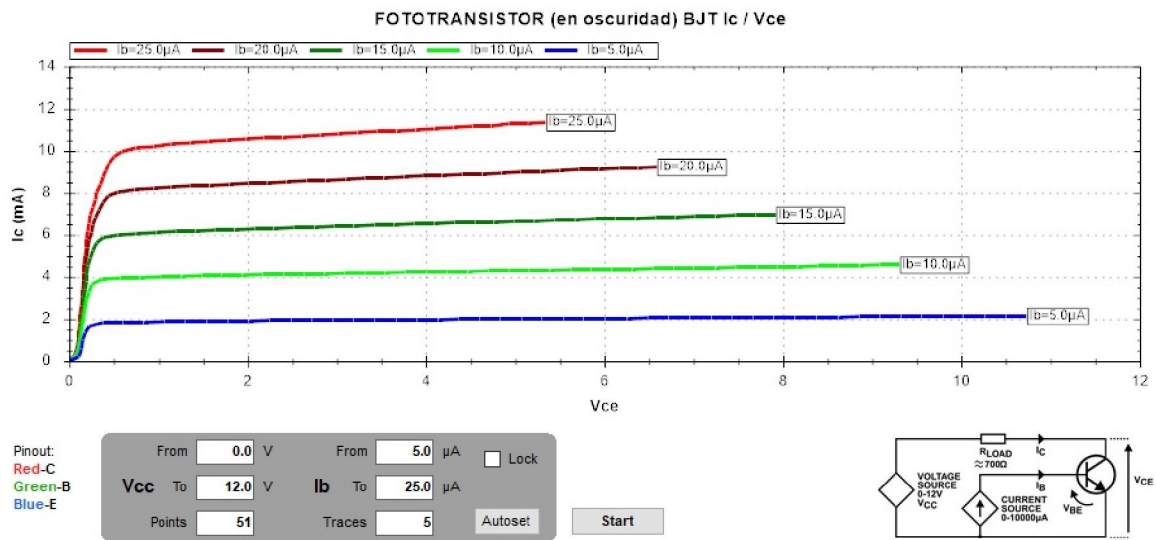


Figura 2.13. Graficas de I_c / V_{ce} del fototransistor en oscuridad obtenida con el generador de curvas y la COT, con los rangos de voltaje V_{ce} y corriente de base I_b aplicados con el circuito eléctrico interno mostrado en la esquina inferior derecha (Fuente: elaboración propia con software PEAK).

2.3.1 Circuito de acondicionamiento básico para fototransistor

“La forma más simple de usar un fototransistor es conectar una resistancia en serie con el colector o el emisor como se muestra en la figura 2.14”, (Sendra, 2001). Estos circuitos se asemejan a divisores de voltaje en colector CDV_C o en emisor CDV_E , figura 2.14 (a) y (b) respectivamente. De esta forma el dispositivo funcionará como un detector fotoconductor obteniendo un voltaje de salida V_o alto o bajo dependiendo de la irradiancia en la base y de la posición de la resistancia en serie.

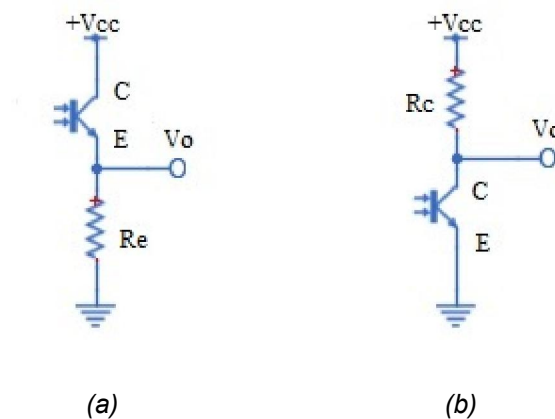


Figura 2.14. Circuitos de acondicionamiento básico con un fototransistor NPN. a) resistancia a emisor y b) resistancia a colector (Fuente: elaboración propia).

2.3.2 Caracterización de Fototransistor FT con COT, CDV_E y CCC manteniendo $I_f = 20 \text{ mA}$.

Se utilizaron diferentes fuentes de luz LED controladas con el CCC con el fin de obtener los correspondientes voltajes de salida V_o en el emisor E del FT con el circuito de acondicionamiento descrito anteriormente en la figura 2.14(a) y que se asemeja a un circuito divisor de voltaje CDV_E. El diagrama esquemático de conexiones propuesto se muestra en la figura 2.15 y el arreglo experimental se muestra en la figura 2.16.

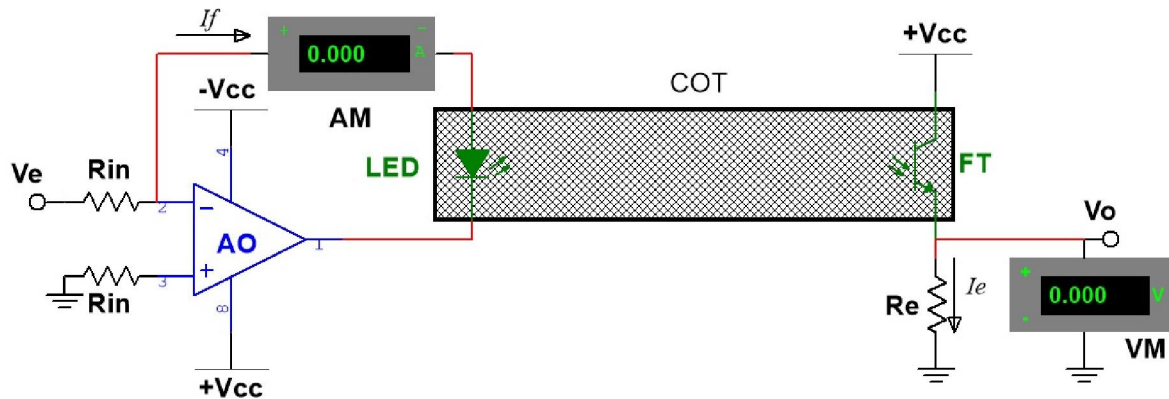


Figura 2.15. Diagrama esquemático de conexiones para realizar la caracterización fotoeléctrica de un FT por medio de LEDs dentro de la COT (Fuente: elaboración propia).

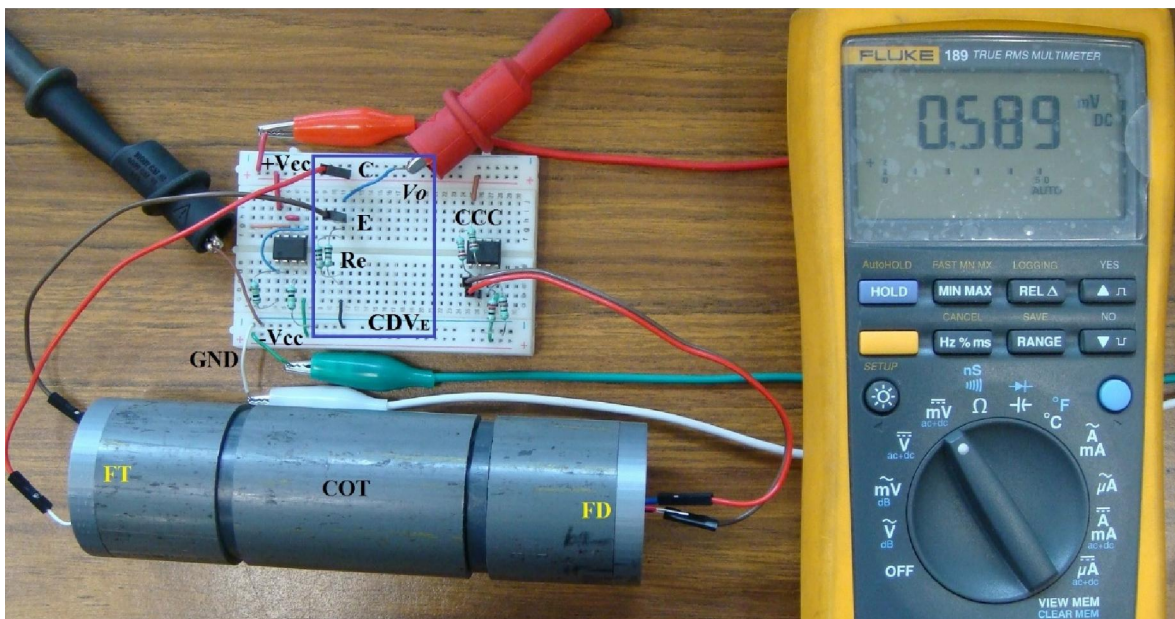


Figura 2.16. arreglo experimental para caracterizar la respuesta en voltaje V_o en el emisor E de un fototransistor FT, enmarcado dentro del cuadro azul, con LEDs de diferente λ en la COT, manteniendo la corriente de operación constante $I_f = 20 \text{ mA}$ (Fuente: elaboración propia).

Se tomando los valores de $V_e = V_{in}$ de la tabla 2.3 para mantener $I_f = 20$ mA con el CCC, el colector C se conecta a la fuente de voltaje $+V_{cc}$, el emisor E a un extremo de una resistencia en serie R_e de $500\ \Omega$ y su otro extremo a un voltaje de referencia de cero voltios GND, como se muestra en el recuadro azul del arreglo experimental de la figura 2.16. De esta forma la intensidad luminosa de la fuente de luz LED incide en la superficie fotosensible del FT y por consecuencia, la fotocorriente generada equivale a la corriente i_b de la base B que permite controlar el flujo de corriente de colector i_c que circula por la resistencia en serie de emisor R_e para obtener un voltaje de salida V_o en el emisor E con respecto a GND, monitorizada por el multímetro digital, y el cual está en función de la λ , la intensidad luminosa que recibe y la sensibilidad del FT.

2.4 Circuito de prueba para fotorresistencias

“Las fotorresistencias son detectores fotosensitivos y a menudo se pueden utilizar en circuitos eléctricos con resistencias fijas o variables con el fin de obtener una señal de voltaje sensible a la intensidad de luz”, (Sendra, 2001).

Una señal de voltaje variable se puede obtener en función de la resistencia variable de una fotorresistencia FR por medio de un simple circuito eléctrico divisor de voltaje CDV, como se muestra en la siguiente figura 2.17.

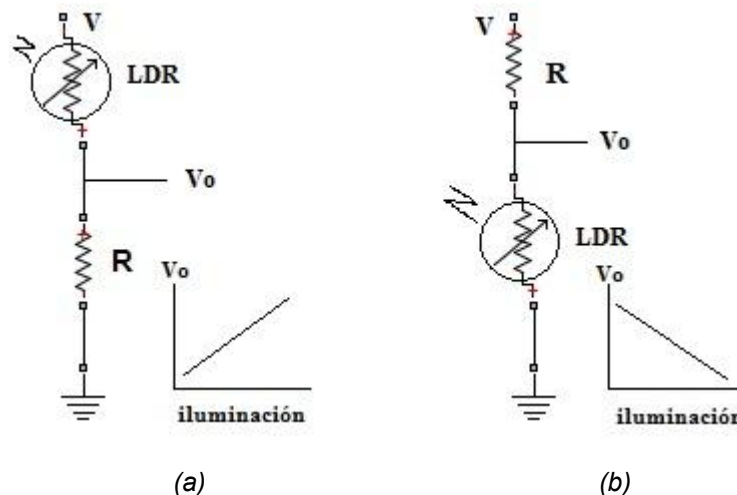


Figura 2.17. Circuitos de prueba con fotorresistencias. (a) Voltaje de salida V_o con pendiente positiva y (b) Voltaje de salida V_o con pendiente negativa (Fuente: elaboración propia).

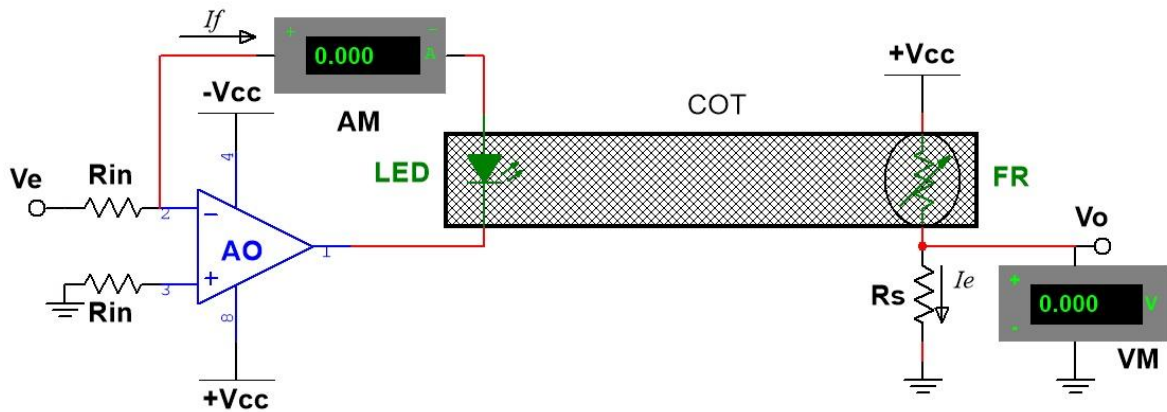
Tomando en cuenta la curva de respuesta de la FR de la figura A2.2(a), Anexo 2, es posible cambiar la posición de R y la FR en el circuito divisor de voltaje CDV para que V_o incremente, figura 2.17(a), o decremente, figura 2.17(b), en función de la iluminación que reciba la superficie fotosensible de la FR (LDR), de acuerdo con las siguientes expresiones,

$$V_o = V \left(\frac{R}{LDR + R} \right) \quad (2.4)$$

$$V_O = V \left(\frac{LDR}{R+LDR} \right) \quad (2.5)$$

2.4.1 Caracterización de Fotorresistencia FR con COT, CDV y CCC manteniendo $I_f = 20 \text{ mA}$.

El valor de la FR se midió en la COT en total oscuridad con un multímetro digital, la cual presentó una resistencia casi infinita y con luz ambiente, afuera de la COT, se midió una resistencia de alrededor de $17 \text{ k}\Omega$. Tomando en cuenta estas dos condiciones extremas se realizó la caracterización fotoeléctrica de la fotorresistencia FR con diferentes fuentes de luz LED controladas con el CCC y manteniendo $I_f = 20 \text{ mA}$, con el fin de obtener los correspondientes voltajes de salida V_O con el circuito de acondicionamiento descrito anteriormente en la figura 2.17(a), en la figura 2.18 se muestra el diagrama esquemático de conexiones del circuito



propuesto.

Figura 2.18. Diagrama esquemático de conexiones para realizar la caracterización fotoeléctrica de LEDs por medio de una FR dentro de la COT (Fuente: elaboración propia).

El circuito en esencia representa un divisor de voltaje CDV formado por la FR en serie con una resistencia $R_s = 10 \text{ k}\Omega$, como se muestra en la figura 2.18. Un extremo de la FR se conectó a un voltaje $+V_{cc} = V_e$ del CCC, tomando los valores de $V_e = V_{in}$ de la tabla 2.3 para mantener $I_f = 20 \text{ mA}$, el otro a un extremo de R_s y el otro extremo de esta a un potencial de cero voltios GND. En el nodo común de estas resistencias se midió el voltaje de salida V_O del divisor de voltaje con un multímetro digital, como se muestra en el arreglo experimental de la figura 2.19. El valor de V_O varió en función de la λ , la intensidad luminosa que recibió y la sensibilidad de la FR.

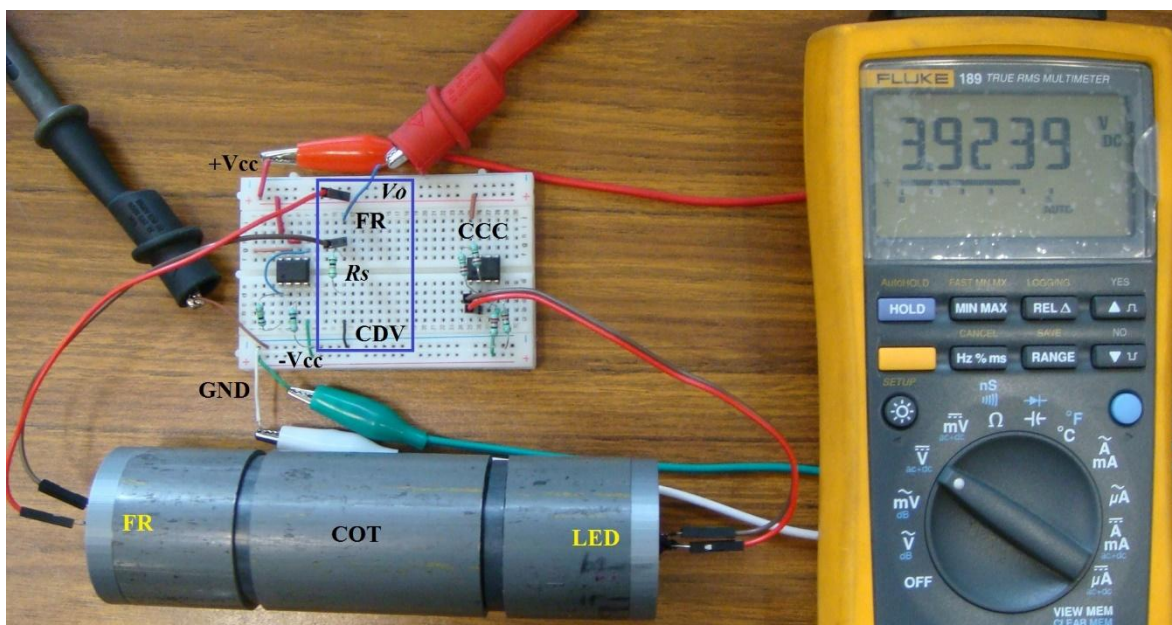


Figura 2.19. Arreglo experimental para caracterizar la respuesta en voltaje V_o , del divisor de voltaje formado por una FR en la COT y una resistencia en serie R_s , enmarcado dentro del cuadro azul, con LEDs de diferente λ y con una corriente de operación constante $I_f = 20$ mA (Fuente: elaboración propia).

3. Resultados experimentales obtenidos con la metodología de caracterización fotoeléctrica

Los resultados obtenidos de las caracterizaciones fotoeléctricas del FD, FT y de la FR se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Voltajes de salida V_o de cada circuito de acondicionamiento electrónico correspondiente al FD, FT y FR con diferentes LEDs con su correspondiente λ en condiciones de oscuridad dentro de la COT, manteniendo su corriente de operación $I_f = 20$ mA. Fuente: elaboración propia.

Acondicionamiento electrónico Dispositivo Optoelectrónico	CCC LED	CDTI FD	CDV _E FT	CDV FR
	I_f [mA]	V_o [V]	V_o [V]	V_o [V]
LED (λ) Infrarrojo (cercano)	20	4.0	4e-3	0.24e-3
Blanco (-)	19.8	4.26	2.95	3.84
LED RGB (λ) Rojo (623 nm)	19.8	0.43	0.75e-3	2.0
Verde (520 nm)	20.1	0.73	0.72e-3	1.61
Azul (470 nm)	19.9	1.03	0.59e-3	1.51

Como puede observarse en la tabla 3.1 los dispositivos fotodetectores presentan la mejor respuesta fotoeléctrica cuando incide luz blanca en su superficie fotosensitiva reflejándose en un voltaje mayor de salida V_o del circuito de acondicionamiento correspondiente. También se puede observar a qué longitud de onda es más sensible la respuesta del FD, FT y la FR, de esta forma se tiene un criterio para elegir un LED con una determinada λ necesaria para alguna aplicación con un fotodetector en particular. En este caso se utilizó un LED RGB con el fin de realizar las mediciones de caracterización fotoeléctrica en la COT sin cambiar la montura del LED RGB, para los casos de las fuentes de luz en las longitudes de onda correspondientes.

4. Aplicación de fotodetectores

4.1 Oscilador controlado por intensidad de luz

“Una forma de cuantificar la intensidad de luz que incide sobre la superficie fotosensible de un fotodetector es transformando esta variable en otra variable física como la frecuencia. Para esto se necesita de una etapa de acondicionamiento electrónico que realice esta función. En este caso se propone un circuito oscilador controlado por intensidad de luz COCIL el cual está conformado por una resistencia R_{in} , un circuito integrador CI (amplificador operacional AO2) y un circuito Schmitt-trigger CST retroalimentado (amplificador operacional AO1), como se muestra en la figura 4.1.

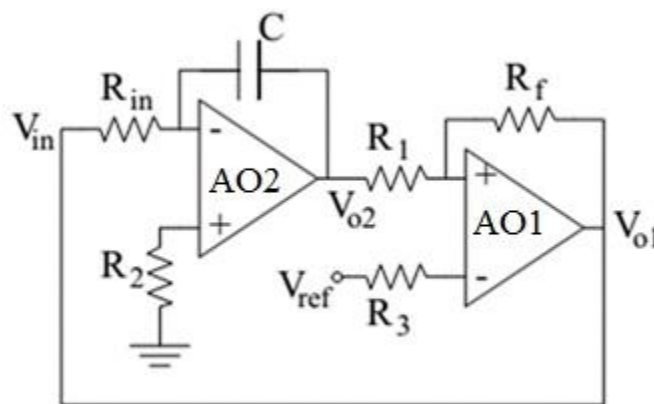


Figura 4:1. Circuito oscilador controlado por intensidad de luz COCIL formado por un circuito integrador CI (AO2) y un circuito Schmitt-trigger CST retroalimentado (AO1) (Sendra, 2001).

Si la señal de entrada V_{o2} varía en los valores de voltaje límite de disparo a $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$ entonces se tendrá una señal de oscilación con período de $t = 2R_{in}C$, (Anexo 2.5). Si la resistencia R_{in} se sustituye por una fotorresistencia FR el periodo de oscilación dependerá directamente del flujo luminoso que incida en esta y por lo tanto midiendo la frecuencia de la oscilación se podría saber el valor de la intensidad luminosa y la longitud de onda λ , si se tiene control de estas variables”, (Sendra,

2001). La función del COCIL se describe en la figura 4.2, de acuerdo con las ecuaciones A2.5.4 y A2.5.5 del Anexo 2.

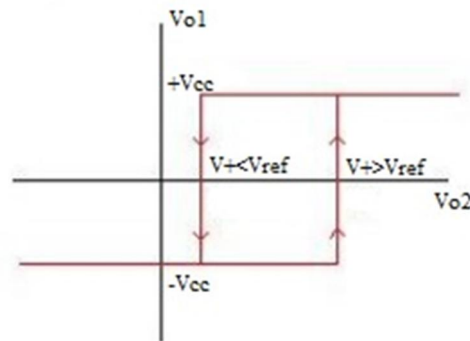


Figura 4.2. Señal de salida V_{o1} versus señal de entrada V_{o2} del CST (Fuente: elaboración propia).

4.2 Implementación del COCIL

Como aplicación práctica se propuso implementar el circuito oscilador controlado por intensidad de luz COCIL para caracterizar la respuesta de una fotorresistencia con diferentes LEDs con su respectiva λ , en la COT, manteniendo su corriente de operación constante $I_f = 20$ mA con el CCC y utilizando la metodología de caracterización fotoeléctrica descrita anteriormente con el arreglo experimental de la figura 2.5. En la figura 4.3 se muestra el diagrama esquemático de conexiones del arreglo experimental completo con el CCC, LED COT, FR y COCIL.

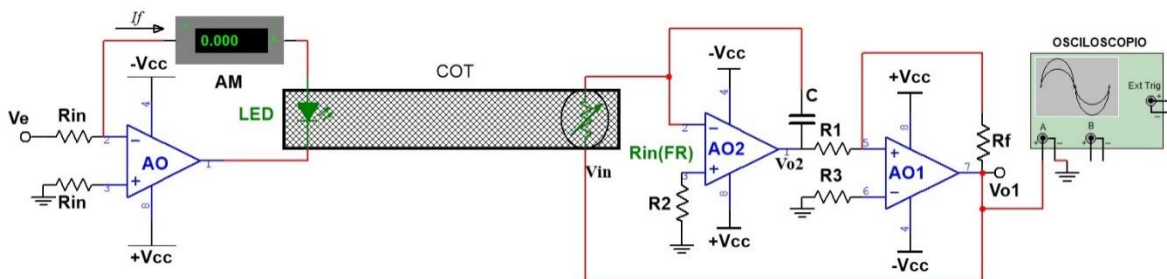


Figura 4.3. Diagrama esquemático de conexiones del arreglo experimental completo para registrar cambios de frecuencia en función de las intensidades luminosas y longitudes de onda de diferentes LEDs (Fuente: elaboración propia).

De esta forma se registró la señal de voltaje $V_{o1}(t)$ con una frecuencia de oscilación f_o en función de la intensidad luminosa y la λ correspondiente a cada LED. El COCIL se implementó con un AO TL072, para el CST $R_f = R_3 = 2R_1 = 10$ k Ω y para el CI con $R_{in} = FR$, $R_2 = 10$ k Ω y $C = 20$ nF, como se muestra en el recuadro azul del circuito electrónico montado en una tarjeta para prototipos, figura 4.4.

El voltaje de salida $V_{o1}(t)$ del COCIL se monitorizó con un osciloscopio para obtener la frecuencia de oscilación f_o para cada LED en operación con la COT, como se muestra en el arreglo experimental de la figura 4.5(a).

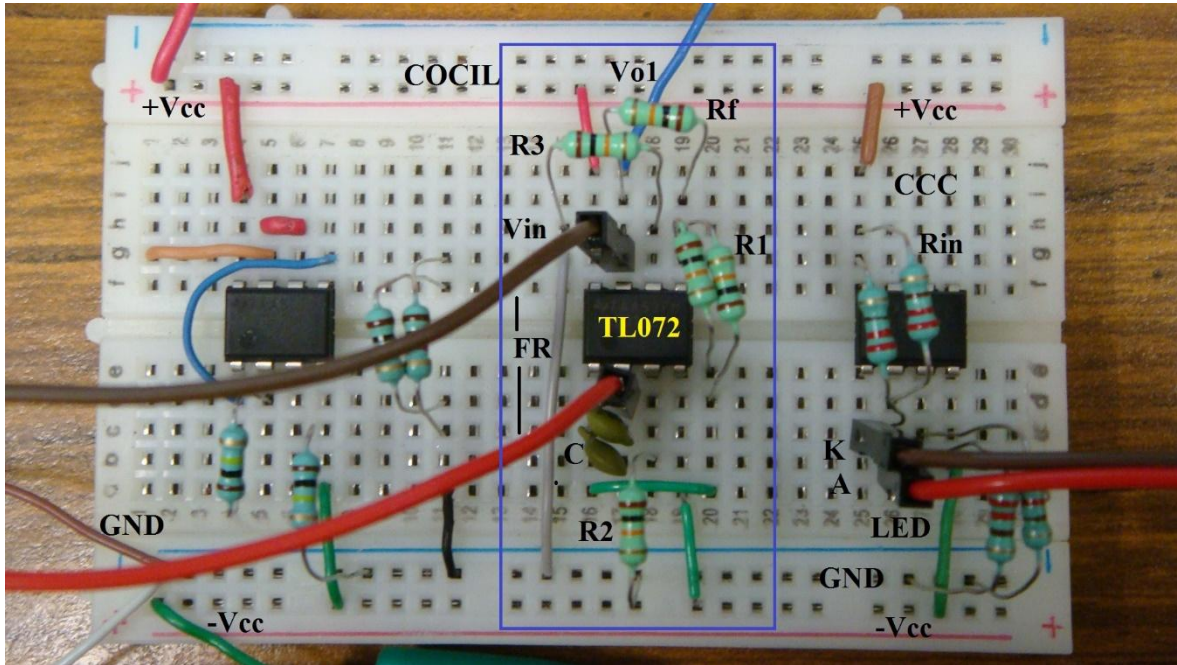
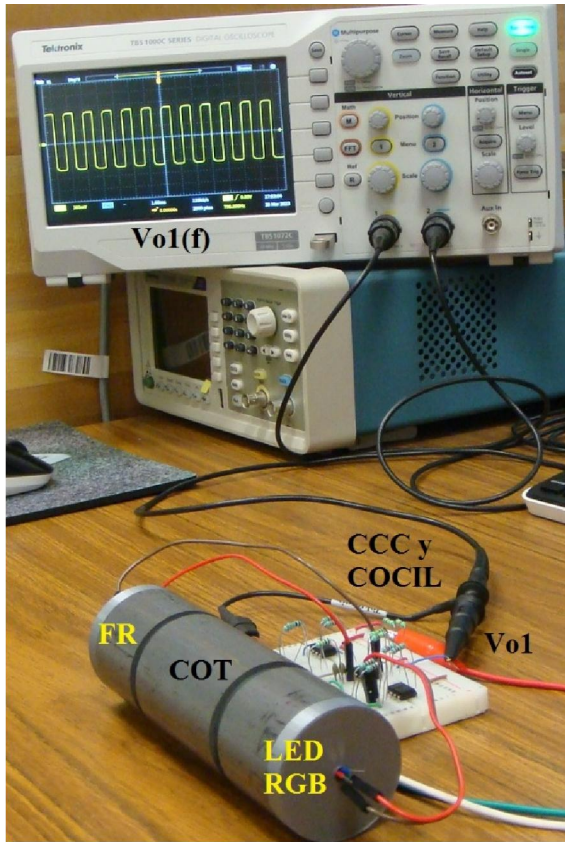


Figura 4.4. Circuito oscilador controlado por intensidad de luz COCIL, enmarcado dentro del cuadro azul en el centro, y a la derecha el CCC para mantener la corriente de operación $I_f = 20 \text{ mA}$ de los LEDs utilizados (Fuente: elaboración propia).

Como se puede observar la señal de voltaje de salida $V_{oi}(t)$ del COCIL presenta una señal cuadrada periódica con frecuencia de oscilación f_o dependiendo de la intensidad luminosa y λ correspondiente a cada LED utilizado en la COT, figuras 4.5(b), (c) y (d). La tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos de f_o con un osciloscopio para cada LED con su respectiva λ e intensidad luminosa. Se puede observar en la tabla 4.1 de resultados que la frecuencia de oscilación f_o del CST es mayor para el LED blanco por emitir con mayor intensidad luminosa y en un rango de longitudes de onda que abarca la mayor sensibilidad de la FR de CdS, como se muestra en la curva de respuesta espectral de la figura 2.2(b) del Anexo 2. Para el caso del LED RGB la f_o es mayor para la λ en el rojo y para el caso del LED infrarrojo es en donde la f_o es menor. Estos resultados están directamente en función de la respuesta de la FR con la intensidad de luz, dado que a menor intensidad de luz mayor resistencia R_{in} y a mayor intensidad de luz menor resistencia R_{in} , como se muestra en la figura A2.2(a) del Anexo 2. El periodo de la señal de voltaje de salida V_{oi} del COCIL se define como $t = 2R_{in}C$, como se mencionó anteriormente. En este caso el COCIL se implementó por simplicidad y para fines demostrativos con un circuito integrado TL072, que cuenta con dos amplificadores operacionales, uno para el CI y el otro para el CST. Debido a esto, la amplitud de la señal de salida $V_{oi}(f_o)$ fue mucho menor que los voltajes de alimentación $\pm V_{cc}$, si se requiere que la amplitud de $V_{oi}(f_o)$ alcance estos valores es recomendable utilizar un AO

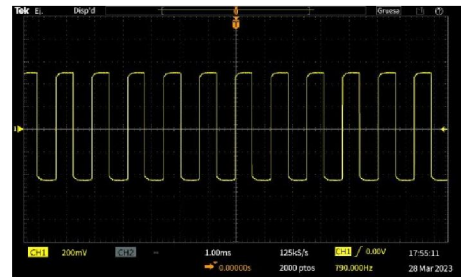
comparador para implementar el CST y obtener el comportamiento que se mostró anteriormente en el análisis teórico del circuito de la figura 4.1.



(a)



(c)



(d)

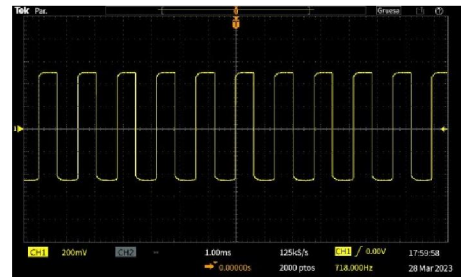


Figura 4.5. a) Arreglo experimental para caracterizar la respuesta de una FR en función de la frecuencia de oscilación con un LED RGB a diferentes longitudes de onda e intensidad luminosa manteniendo su corriente de operación $I_f = 20$ mA, b) frecuencia de oscilación $f_o = 1.118$ kHz para $V_{o1}(f_o)$ con $\lambda = 632$ nm del LED en el rojo, c) frecuencia de oscilación $f_o = 790$ Hz para $V_{o1}(f_o)$ con $\lambda = 520$ nm del LED en el verde y d) frecuencia de oscilación $f_o = 718$ Hz para $V_{o1}(f_o)$ con $\lambda = 470$ nm del LED en el azul (Fuente: elaboración propia).

Tabla 4.1. Frecuencias de oscilación obtenidas con diferentes LEDs manteniendo constante la corriente de operación I_f y cada uno con su respectiva λ e intensidad luminosa incidiendo en una FR dentro de la COT (Fuente: elaboración propia).

LED	Infrarrojo Cercano	Blanco	RGB Rojo	RGB Verde	RGB Azul
λ [nm]	-	-	632	520	470
I_f [mA]	20	20	20	20	20
f_o [Hz]	54	4544	1118	790	718

Conclusiones

Las actividades experimentales realizadas con la COT se pueden utilizar para realizar una caracterización optoelectrónica de los dispositivos optoelectrónicos utilizados cuando no se cuenta con las especificaciones técnicas de estos. También es posible plantear otras actividades prácticas de caracterización de materiales por medio de la transmisión y/o absorción de luz colocando en las ventanas internas de la COT algún material con cierta transparencia y utilizando alguna fuente de luz en un rango de longitud de onda en el que el fotodetector elegido tenga una sensibilidad adecuada en un rango de λ . El material descrito en este trabajo se puede utilizar de forma didáctica para la enseñanza y aprendizaje de la instrumentación, optoelectrónica y electrónica a nivel licenciatura y maestría en ciencias e ingeniería proponiendo actividades prácticas en laboratorio relacionadas con los temas mencionados.

Agradecimientos

Al Técnico en Fabricación David García Flores y al Dr. Jorge Uc Martín por el apoyo en el diseño, maquinado y fabricación de las Cámaras Oscuras Tubulares.

Referencias

Guadarrama Santana Asur, Martínez Gutiérrez Daniel y García Valenzuela Augusto (2024). Método didáctico de caracterización fotoeléctrica LED-Fotodiodo. VI CONCAPLA 2024, 5 al 8 noviembre, Veracruz México.

Chapter 02. Si photodiodes

<https://www.hamamatsu.com/us/en.html>

Disponible en: <https://es.escribd.com/document/394457408/e01-Handbook-Introduction>, [Consultado enero-2023]

Graeme J. (1996). Photodiodes Amplifier, OP AMP solutions”, New York, Ed. Mc Graw-Hill.

Pérez García A. Curso Optoelectrónica. Instituto de San Luis Potosí. Disponible en:

http://galia.fc.uaslp.mx/~cantocar/alfonso_perez_garcia/optoelectronica/texto/opto.pdf

PerkinElmer Optoelectronics, Datasheet VT900, p 14. www.perkinelmer.com/opto
Disponible en: rlocman.es/datasheet/pdf.html?di=165937

Sendra Sendra, J. R. (2001). Dispositivos Opto-electrónicos. Disponible en: <https://docplayer.es/39713345-Dispositivos-optoelectronicos-jose-ramon-sendra-sendra.html>

TT Electronics (08/2016) Issue A, www.ttelectronics.com

Vishay Semiconductors (Rev. 1.9, 22-Nov-11), www.vishay.com

ANEXO 1

Diagramas esquemáticos

1. Diagramas esquemáticos de la Cámara Oscura Tubular

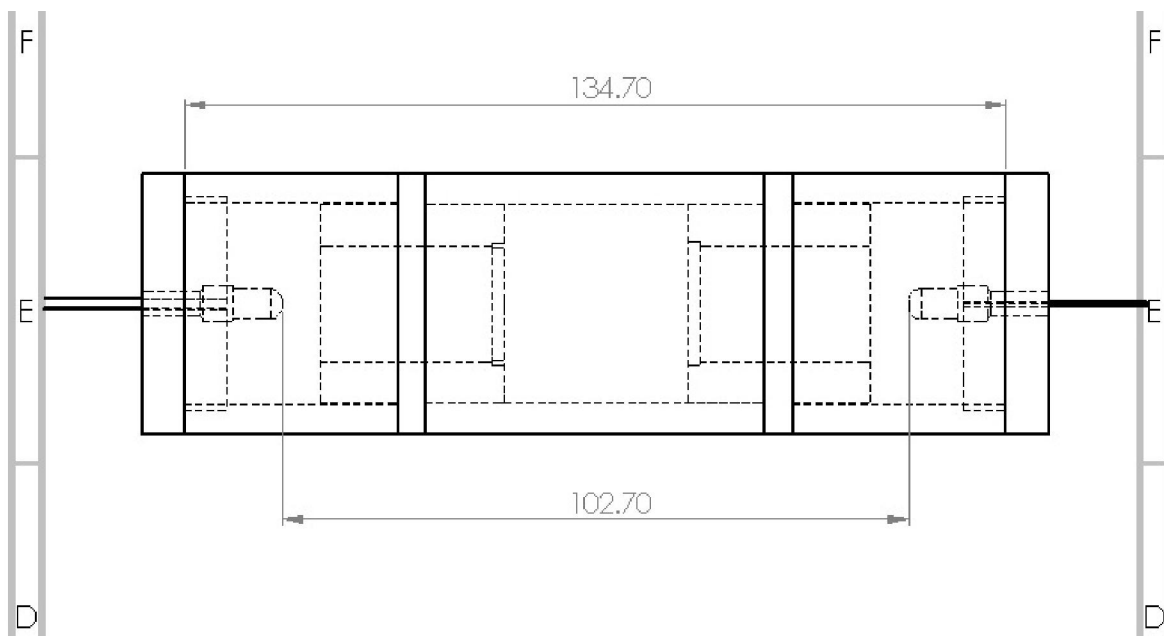


Figura A1.1. Esquemático con longitudes en mm entre LEDs y extremos de la COT.

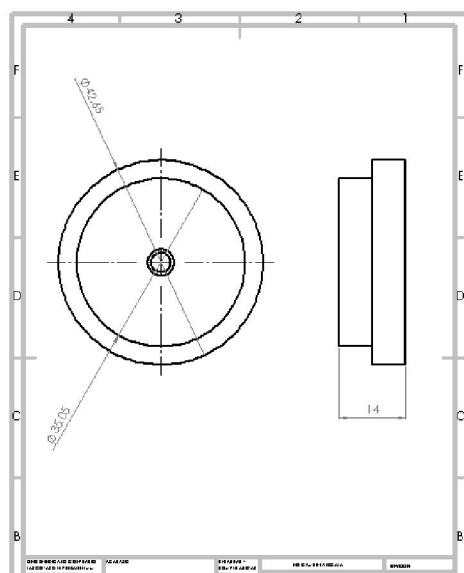


Figura A1.2. Espesor y diámetros internos y externos en mm de las tapas laterales.

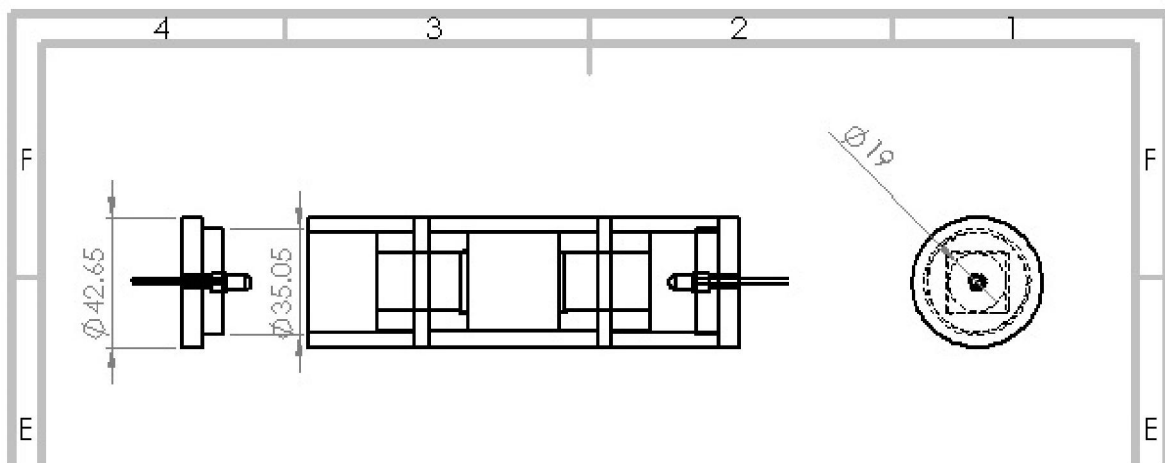


Figura A1.3. Diámetros interno y externo en mm de las tapas laterales.

ANEXO 2

Antecedentes

2. Dispositivos optoelectrónicos

Los dispositivos optoelectrónicos que se proponen para utilizarse con la cámara oscura propuesta son los siguientes: Fotorresistencia FR, Fotodiodo FD, Fototransistor FT y LEDs con diferentes longitudes de onda.

Para obtener el mejor funcionamiento de cada dispositivo se requiere de un acondicionamiento electrónico apropiado en función de sus especificaciones técnicas dadas por el fabricante y de la aplicación destinada.

2.1 Fotorresistencia

“Las fotorresistencias o fotoconductores (LDR del inglés Light Dependent Resistors) se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir en él radiación óptica (radiación electromagnética con longitud de onda entre 1 nm y 10 nm). Su símbolo eléctrico y forma de la superficie fotosensible se muestra en la figura A2.1.

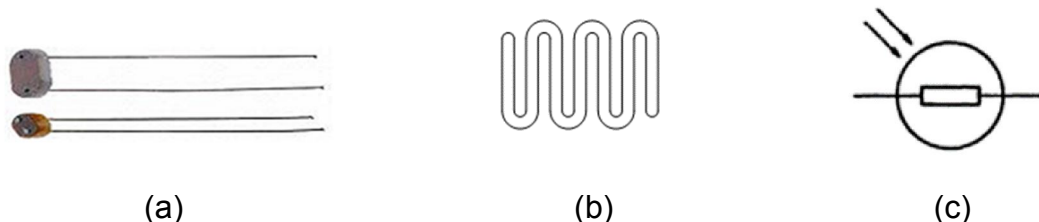


Figura A2.1. a) Fotorresistencia comercial, b) Forma de la superficie fotosensible y c) Símbolo eléctrico (Sendra, 2001).

La relación entre la resistencia R de un fotoconductor y la iluminación, E (densidad superficial de energía recibida expresada en lux), es fuertemente no lineal. Un modelo simple es, $R = AE^{-\alpha}$. Donde A y α dependen del material y las condiciones de fabricación. Para el Sulfuro de Cadmio (CdS), por ejemplo, $0.7 < \alpha < 0.9$. En la figura A2.2 se presenta gráficamente esta relación para un modelo concreto de CdS.

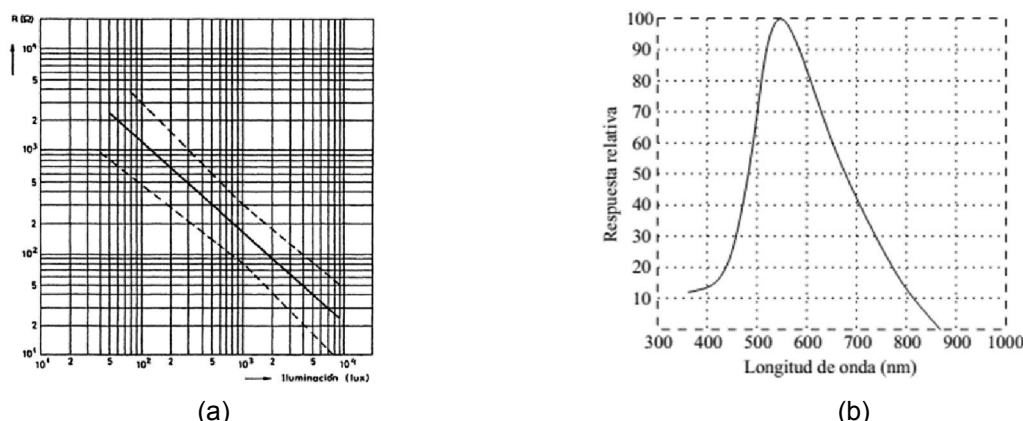


Figura A2.2. Curvas de respuesta de una fotorresistencia de CdS. (a) Relación de la resistencia $R(\Omega)$ con la Iluminación (lux) y (b) Respuesta espectral (Sendra, 2001).

La longitud de onda relativa de la fotorresistencia FR es dependiente de la longitud de onda (color) de la luz incidente. Puede observarse, además de la no linealidad, que la relación entre la resistencia en presencia de luz disminuye y la resistencia en la oscuridad es muy alta (superior a $10^4 \Omega$). Cada tipo de material fotoconductor tiene su propia curva de respuesta a la longitud de onda y en un cierto rango será más fotosensible. La respuesta espectral del CdS se muestra en la figura A2.2(b).

Tabla A2.1. Datos técnicos de la fotorresistencia VT935G (PerkinElmer Datasheet VT900)

Características técnicas	VT935G
Respuesta espectral de pico	550 nm
Resistencia de la célula a 10 Lux (min-max)	10 k Ω - 50 k Ω
Resistencia en oscuridad (mín.)	1 M Ω
Tensión de pico (máx.)	100 V
Potencia disipada (máx.)	80 mW
Tiempo de subida (norm.)	35 ms
Tiempo de bajada (norm.)	5 ms
Temperatura de funcionamiento	25°C

En la tabla A2.1 se muestran algunos datos técnicos de la FR comercial VT935G”, (Sendra, 2001).

2.2. Fotodiodo

Los fotodiodos son diodos semiconductores que operan polarizados inversamente. Durante la absorción de la luz, cuando un fotodiodo FD es iluminado, las partículas de energía luminosa, también llamadas fotones, son absorbidas generando pares electrón-hueco, que en presencia de un campo eléctrico producen una corriente eléctrica. Cuando se aplica un voltaje a un fotodiodo de Silicio (Si) en un estado de oscuridad, la curva de corriente vs voltaje característica que se observa es similar a la curva de un diodo rectificador convencional, como se muestra en la curva 1 de la figura A2.3.

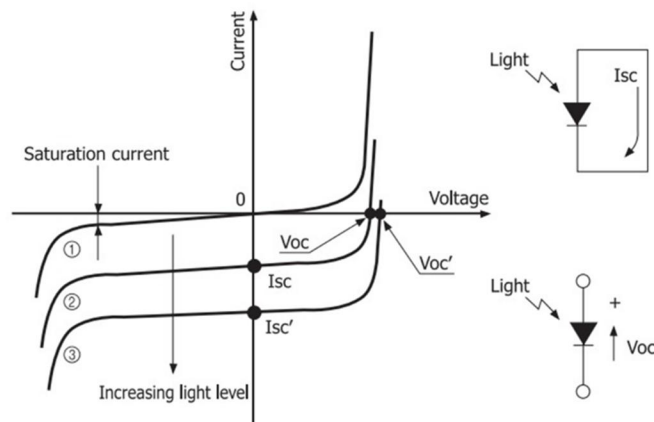


Figura A2.3. Curvas características del fotodiodo de corriente vs voltaje y símbolo electrónico (Hamamatsu, Chapter 02. Si photodiodes).

Sin embargo, cuando la luz incide en el fotodiodo, la curva en 1 cambia a 2 e incrementando el nivel de luz incidente esta curva característica sigue en paralelo a la posición 3. Así como para las curvas características de 2 y 3, si las terminales del fotodiodo se ponen en corto, una corriente de corto circuito I_{sc} o I_{sc}' proporcional al nivel de luz fluirá desde el ánodo al cátodo.

Si el circuito se abre, se generará un voltaje de circuito abierto V_{oc} o V_{oc}' con la polaridad positiva en el ánodo. V_{oc} cambia logarítmicamente con cambios en el nivel de luz pero generalmente varía con la temperatura, haciéndolo inestable para las mediciones de nivel de luz.

La medida de la sensibilidad es el cociente de la energía radiante (en watts) incidente sobre el fotodiodo y la corriente de salida del fotodiodo en amperes. Se expresa como una sensibilidad absoluta S en amperes por watt (A/W). Note que la energía radiante generalmente se expresa como watts por centímetro cuadrado y que la corriente del fotodiodo se expresa en amperes por centímetro cuadrado, por lo que los cm^2 se cancelan y solo dejamos amperes por watt (A/W). Una curva típica de sensibilidad que muestra A/W como función de la longitud de onda se presenta en la figura A2.4.

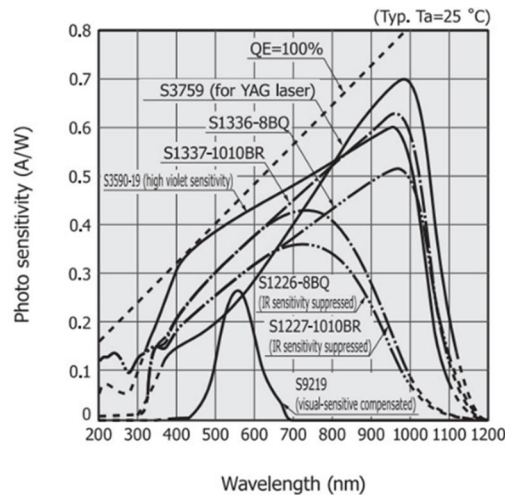


Figura A2.4. Curvas de respuesta espectral de diferentes fotodiodos de Si (Hamamatsu, Chapter 02. Si photodiodes).

La longitud de onda de radiación a ser detectada es un parámetro importante. Como se puede ver en la gráfica anterior, el silicio llega a ser transparente para longitudes de onda mayores que 1100 nm. Por lo tanto, no es apto para usarse con longitudes de onda λ más allá de esta. La luz ultravioleta por el contrario se absorbe en los primeros 100 nm del grosor del silicio. Aun la preparación más cuidadosa de la superficie deja algunos daños, lo cual reduce la eficiencia de recolección para esta longitud de onda (λ), Hamamatsu. En la tabla A2.2 se muestran los algunos parámetros técnicos característicos de un fotodiodo PIN de silicio comercial BPV10 Vishay Semiconductors.

Tabla A2.2. Parámetros técnicos del fotodiodo BPV10 (Vishay Semiconductors, 2022).


VISHAY

www.vishay.com

BPV10

Vishay Semiconductors

BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	$I_F = 50\text{ mA}$	V_F		1.0	1.3	V
Breakdown voltage	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $E = 0$	V_{BR}	60			V
Reverse dark current	$V_R = 20\text{ V}$, $E = 0$	I_{D0}		1	5	nA
Diode capacitance	$V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$	C_0		11		pF
	$V_R = 5\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$	C_0		3.8		pF
Open circuit voltage	$E_A = 1\text{ klx}$	V_O		480		mV
	$E_A = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	V_O		450		mV
Short circuit current	$E_A = 1\text{ klx}$	I_K		80		μA
	$E_A = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	I_K		65		μA
Reverse light current	$E_A = 1\text{ klx}$, $V_R = 5\text{ V}$	I_{A0}		85		μA
	$E_A = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$, $V_R = 5\text{ V}$	I_{A0}	38	70		μA
Absolute spectral sensitivity	$V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 950\text{ nm}$	$s(\lambda)$		0.55		A/W
Angle of half sensitivity		φ		± 20		deg
Wavelength of peak sensitivity		λ_p		920		nm
Range of spectral bandwidth		$\lambda_{0.1}$		380 to 1100		nm
Quantum efficiency	$\lambda = 950\text{ nm}$	η		72		%
Noise equivalent power	$V_R = 20\text{ V}$, $\lambda = 950\text{ nm}$	NEP		3×10^{-14}		W/Hz
Detectivity	$V_R = 20\text{ V}$, $\lambda = 950\text{ nm}$	D		3×10^{12}		$\text{cm}^2\text{Hz/W}$
Rise time	$V_R = 50\text{ V}$, $R_L = 50\text{ }\Omega$, $\lambda = 820\text{ nm}$	t_r		2.5		ns
Fall time	$V_R = 50\text{ V}$, $R_L = 50\text{ }\Omega$, $\lambda = 820\text{ nm}$	t_f		2.5		ns

BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)

2.3 Fototransistor

“El fototransistor FT sigue el mismo principio de funcionamiento de la fotorresistencia FR o del fotodiodo FD, su peculiaridad consiste en su amplificación de señal debido al efecto transistor, la fotogeneración de portadores se realiza en la base, los símbolos electrónicos con los que nos podemos encontrar un fototransistor se pueden en la figura A2.5. Hay dos símbolos uno con terminal de base (en este caso para dispositivos npn, que son los normales) y el otro sin él. En el primer caso la corriente que entra por la base es la suma de la señal electrónica y la fotogenerada mientras que en el segundo caso sólo podemos tener señal fotogenerada. Si nos olvidamos por un momento de la señal fotogenerada el comportamiento del dispositivo es exactamente igual que el del transistor convencional. El uso del fototransistor se puede dividir en dos grupos dependiendo de si el dispositivo tiene dos o tres terminales, como se muestra en la figura A2.5.

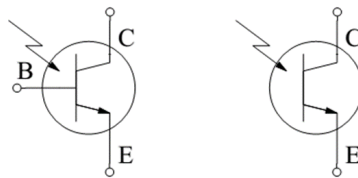


Figura A2.5. Símbolos electrónicos del fototransistor (Sendra, 2001).

En el caso de que tenga tres terminales su uso será idéntico al de un transistor normal, con la única diferencia de que la señal dada en lugar de venir de forma electrónica nos llega de forma fotónica”.

2.3.1 Corriente de colector frente a tensión colector-emisor y sensibilidad espectral

“La familia de curvas características de la figura A2.6(a) muestra que son iguales a las de un transistor normal salvo que cada curva lleva asociada una irradiancia en lugar de una corriente de base. El dato interesante será qué corriente generará el dispositivo cuando una determinada cantidad de luz incida sobre él. Como en todo sensor fotónico un parámetro fundamental es la respuesta relativa del dispositivo a distintas longitudes de onda, en este caso podemos ver en la figura A2.6(b) que la máxima sensibilidad se produce a los 860nm (esta cifra también la da el fabricante de forma numérica) y el rango útil se extiende desde los 700 nm hasta los 1100 nm.

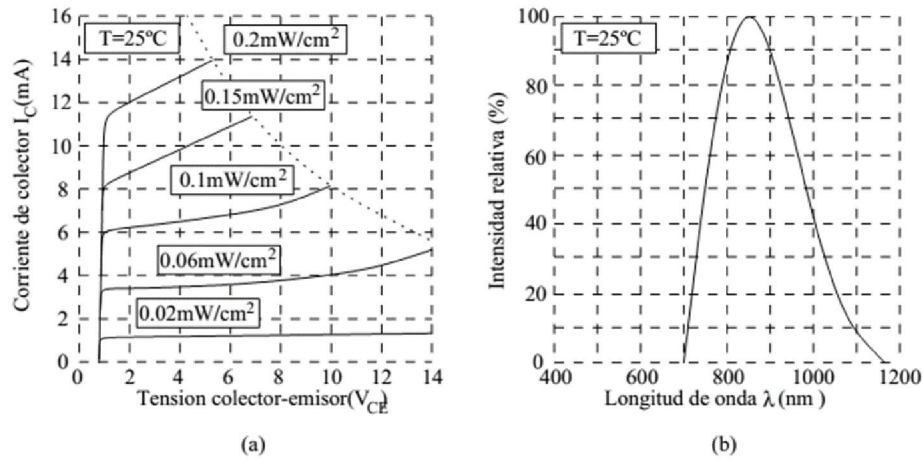


Figura A2.6. (a) Curvas de la corriente de colector frente a la tensión colector – emisor. (b) Sensibilidad espectral del fototransistor PT430 (Sendra, 2001).

En la tabla A2.3 se presentan algunas especificaciones eléctricas de un fototransistor NPN comercial OP800SL de TT Electronics”, (Sendra, 2001).

Tabla A2.3. Especificaciones eléctricas del fototransistor NPN OP800SL (TT Electronics, 2016).

NPN Phototransistor

OP800SL Series, OP800WSL Series

OP830SL Series, OP830WSL Series



Electrical Specifications

Absolute Maximum Ratings ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)	
Storage Temperature Range	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range	-65°C to $+125^\circ\text{C}$
Collector-Base Voltage (applies to OP800SL only - does not apply to OP800WSL)	30 V
Collector-Emitter Voltage OP800 (SL, WSL) OP830 (SL, WSL)	30 V 15 V
Emitter-Base Voltage (applies to OP800 (SL, WSL) only)	5 V
Emitter-Collector Voltage (applies to all OP800 and OP830 devices)	5 V
Continuous Collector Current	50 mA
Lead Soldering Temperature [1/16 inch (1.6 mm) from case for 5 seconds with soldering iron]	$260^\circ\text{C}^{(1)}$
Power Dissipation	$250\text{ mW}^{(2)}$

2.4 Diodo Emisor de Luz (LED)

“El comportamiento eléctrico del led es similar al de un diodo semiconductor, en la figura A2.7(a) se muestran los componentes internos de un LED. El voltaje en directa entre el ánodo A y cátodo K del LED es más alto, y es diferente por los diferentes materiales usados para los diferentes longitudes de onda (colores), como se muestra en las curvas de corriente del LED vs voltaje entre el A y K del LED $I-V$ A2.7(b). El voltaje en directa crece conforme crece la corriente y decrece con la temperatura en alrededor de $2\text{mV}/^\circ\text{C}$. Y como todos los semiconductores el LED se

degrada a temperaturas de operación muy altas. El comportamiento óptico del LED varía significativamente con la temperatura. Primero la cantidad de luz emitida por la lámpara LED decrece cuando la temperatura de la unión NP crece. Esto es debido a que existe un incremento en la recombinación de huecos y electrones que hace que no contribuyan a la emisión de luz, también la longitud de onda emitida λ cambia con la temperatura, principalmente porque la banda de energía del semiconductor cambia con la temperatura” (Pérez).

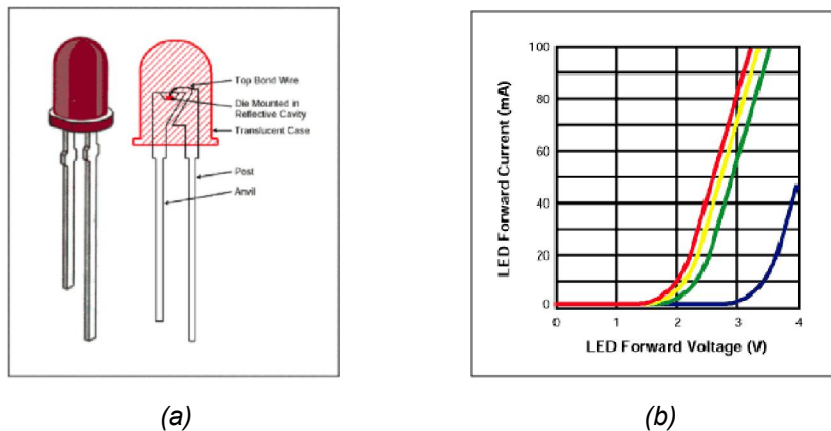


Figura A2.7. (a) LED con sus componentes internos y (b) Curvas I-V para diferentes LEDs con su respectiva longitud de onda (color) (Pérez).

2.4.1 Características técnicas

Si olvidamos la configuración externa y el encapsulado los detalles de funcionamiento de mayor interés para la utilización de LEDs son:

- Potencia óptica y espectro de emisión
- Característica tensión-corriente.
- Comportamiento en régimen no continuo
- Influencia con la temperatura

2.4.2 Potencia óptica y espectro de emisión

Para los LEDs que emiten en el visible, el color percibido por el ojo humano depende del espectro de emisión aunque no tiene porque haber una dependencia directa, de hecho nos encontramos con dos parámetros:

- Longitud de onda de pico λ_p , que es la que corresponde a la intensidad máxima de emisión.
- Longitud de onda dominante λ_d , que está relacionada con el color captado por el ojo humano, como se mencionó previamente no tiene porque coincidir con λ_p . Así que dos emisores con distinta λ_p pueden tener aparentemente el mismo color.

En la figura A2.8(a) podemos ver el espectro de emisión de cinco LEDs distintos, de menor a mayor longitud de onda tenemos un LED azul (C503B-BCS), verde (HLMP3950), amarillo (HLMP3850), rojo (HLMP3750) e infrarrojo (GL480).

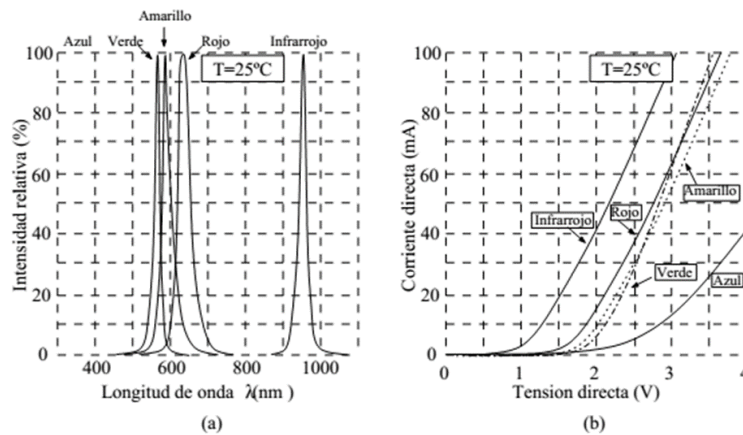


Figura A2.8. Características de cinco LEDs, (a) Espectro de emisión (b) Curvas I-V (Sendra, 2001, p.39).

2.4.3 Curva característica tensión-corriente

“Esta curva característica tiene la misma forma para cualquier diodo, ya sea un diodo rectificador, un fotodiodo, un LED o incluso un diodo láser, las diferencias entre los distintos componentes estarán en la pendiente de la curva en directa (que tiene que ver con la resistencia serie del dispositivo), la tensión de ruptura en inversa y la tensión umbral para la que la conducción se hace importante.

Si analizamos sólo los LEDs nos encontramos que la principal diferencia entre ellos es la tensión umbral, como la longitud de onda de emisión depende directamente de la anchura de la banda prohibida del dispositivo y esta va a ser también la que nos fije cuánta tensión de directa hay que poner para que las bandas de conducción de la zona p y n se acerquen lo suficiente para que empiece la conducción. De esto podremos deducir que cuanto mayor sea la longitud de onda de emisión menor será la tensión umbral. En la figura A2.8(b) tenemos las curvas I-V de los mismos cinco LEDs de la figura A2.8(a), en donde se muestran sus respectivos espectros de emisión. Podemos apreciar que la tensión umbral crece cuando la longitud de onda decrece, es decir, cuando crece la energía de los fotones emitidos (mayor ancho de banda prohibido).

La curva tensión-corriente habrá que tenerla muy en cuenta cuando diseñemos un circuito ya que estamos acostumbrados a decir que en un diodo en directa caen 0.7 V y vemos que esto no es cierto para los LEDs ya que no son de Si, al contrario que la mayoría de los diodos rectificadores”, (Sendra, 2001).

En la tabla A2.4 se muestran algunas especificaciones técnicas de tres LEDs HLMP con diferente longitud de onda (rojo, amarillo y verde).

Tabla A2.4. Especificaciones técnicas de tres LEDs HLMP con diferente longitud de onda (rojo, amarillo y verde) (Avago Technologies, 2015).

Absolute Maximum Ratings at $T_A = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Red	Yellow	Green/Emerald Green	Units
Peak Forward Current	90	60	90	mA
Average Forward Current ^[1]	25	20	25	mA
DC Current ^[2]	30	20	30	mA
Transient Forward Current ^[3] (10 μs Pulse)	500	500	500	mA
Reverse Voltage ($I_R = 100 \mu\text{A}$)	5	5	5	V
LED Junction Temperature	110	110	110	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range	-40 to +100	-40 to +100	-20 to +100	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	-40 to +100	-40 to +100	-40 to +100	$^\circ\text{C}$

Notes:

1. See Figure 2 to establish pulsed operating conditions.
2. For Red and Green series derate linearly from 50°C at $0.5 \text{ mA}/^\circ\text{C}$. For Yellow series derate linearly from 50°C at $0.2 \text{ mA}/^\circ\text{C}$.
3. The transient peak current is the maximum non-recurring peak current the devices can withstand without damaging the LED die and wire bonds. It is not recommended that the device be operated at peak currents beyond the Absolute Maximum Peak Forward Current.

2.5 Análisis del COCIL

Realizando un análisis de voltajes del COCIL de la figura 4.1 se tiene que:

“La señal de salida V_{o2} para el CI se define como,

$$V_{o2}(t) = V_{to} - \int_{to}^t \frac{V_{in}}{R_{in}C} dt \quad (\text{A2.5.1})$$

Y para el caso de una señal de entrada constante,

$$V_{o2}(t) = V_{to} - \frac{V_{in}}{R_{in}C} t \quad (\text{A2.5.2})$$

Por lo general el CST utiliza la hitéresis para prevenir el ruido que podría superar a la señal original y que causaría cambios falsos de estado si los niveles de referencia y entrada son parecidos. Esto provoca que el circuito cree una banda centrada en V_{ref} , con niveles de disparo en los voltajes de la entrada inversora y no inversora $V_{\pm}$ del AO1. Cuando $V_{\pm} = (V_+ - V_-) < 0$ la salida V_{o1} satura negativamente con el valor de alimentación del AO1 ($V_{o1} = -V_{cc}$); por otra parte, si $V_{\pm} = (V_+ - V_-) > 0$ la salida V_{o1} satura positivamente con el valor de alimentación del AO1 ($V_{o1} = +V_{cc}$).

Analizando el circuito de la figura 4.1 el voltaje V_+ se define como,

$$V_+ = V_{o2} \frac{R_f}{R_1 + R_f} + V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_f} \quad (\text{A2.5.3})$$

Suponiendo que $V_{o1} = -V_{cc}$ y $V_- = V_{ref}$ y sustituyendo V_+ en $V_{\pm} = (V_+ - V_-) < 0$ se tiene,

$$V_+ - V_{ref} = V_{o2} \frac{R_f}{R_1 + R_f} - V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_f} - V_{ref} \quad (\text{A2.5.4})$$

Entonces para la condición de saturación negativa ($V_{o1} = -V_{cc}$) del AO1 se tiene que cumplir que $V_+ < V_{ref}$. Si $V_+ > V_{ref}$ no se cumple entonces ($V_{o1} = +V_{cc}$), esto implica que se tenga la condición de saturación positiva y $V_{\pm} = (V_+ - V_-) > 0$ se define como,

$$V_+ - V_{ref} = V_{o2} \frac{R_f}{R_1 + R_f} + V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_f} - V_{ref} \quad (\text{A2.5.5})$$

Entonces para la condición de saturación positiva ($V_{o1} = +V_{cc}$) del AO1 se tiene que cumplir que $V_+ > V_{ref}$. Si $V_+ < V_{ref}$ no se cumple entonces ($V_{o1} = -V_{cc}$), esto implica que se tenga la condición de saturación negativa" (*Sendra, 2001*). La función descrita se representa en la figura 4.2.