

## **Práctica B.1: Aplicación de dispositivos detectores de luz: fotorresistencia, fotodiodo y fototransistor.**

### **Material**

Fotorresistencia (luz visible) NORP12.  
Leds rojo y verde.  
Fotodiodo (luz visible) BPW21  
Fototransistor (luz visible) SFH309  
IR Fototransistor SFH309FA  
IR Led SFH409 ó SFH487.  
Caja oscura.  
Regulador de línea.  
Foco halógeno.  
Fuente de alimentación.  
Generador de funciones.

Placa de pruebas.  
Luxómetro.  
Multímetro.  
Resistencias varias.  
Amplificador operacional TL081/ TL071  
Comparador LM311  
Diodo Zener de 5.1V  
Condensadores varios.  
Transistor BJT pnp BC558.  
Potenciómetro de 10k $\Omega$ .

### **Introducción.**

En esta práctica se van a caracterizar los distintos tipos de dispositivos empleados como detectores de luz y se van a poner en práctica algunas de sus aplicaciones. *El correcto desarrollo de la práctica se debe comprobar a través de las hojas de especificaciones de los componentes.*

El comportamiento de los dispositivos detectores de luz se basa en la respuesta de éstos cuando incide radiación sobre el material semiconductor que los constituye. Al incidir esta radiación, los electrones de la banda de valencia del semiconductor adquieren suficiente energía para poder ser excitados hacia la banda de conducción, superando el gap de energía que existe entre las dos bandas. De esa forma se genera un hueco en la banda de valencia y un electrón en la banda de conducción. Para que esto ocurra la energía del fotón debe ser mayor o igual a la energía del gap. La respuesta espectral, máxima longitud de onda que el semiconductor puede absorber, dependerá del gap de energía y como el gap es distinto para cada semiconductor, dependiendo del material semiconductor utilizado, se absorberá una radiación u otra. Veamos los diferentes fotodetectores que vamos a utilizar a lo largo de la práctica:

### **Fotorresistencia**

La resistencia de una fotorresistencia disminuye al aumentar la intensidad luminosa. Para comprobar dicho efecto se puede emplear uno de los circuitos de la figura 1. Nosotros emplearemos la configuración de medida directa para la realización de esta práctica.



**Figura 1.-** Medida directa de la resistencia de la fotorresistencia con el multímetro o medida indirecta determinando la caída de tensión en un divisor resistivo.

Para la caracterización de la fotorresistencia, dicho circuito se va a introducir en el interior de un dispositivo regulador de la iluminación y medirla utilizando un luxómetro. Dicho dispositivo regulador de la iluminación se consigue mediante el empleo de una “caja

oscura” y el montaje de la figura 2. Tanto la fotorresistencia como el luxómetro deben estar enfocados hacia el foco de luz y ambos a igual distancia del eje de incidencia de la luz. De esa forma el luxómetro estará igualmente iluminado que la fotorresistencia.

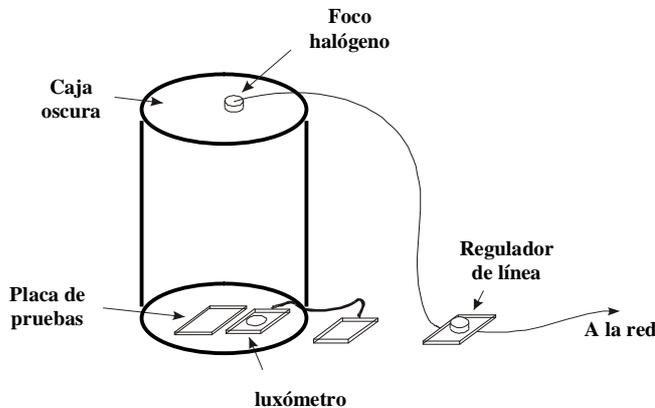


Figura 2.- Montaje experimental.

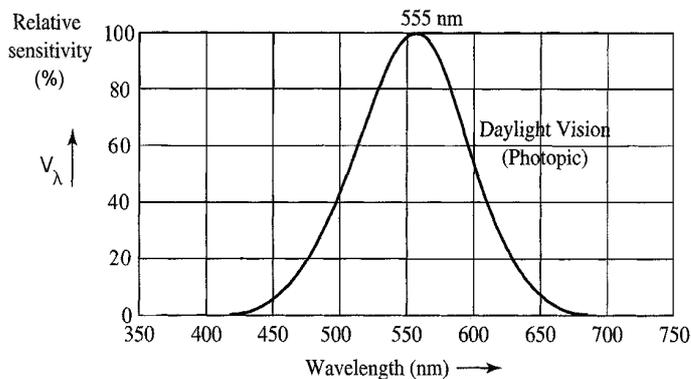


Figura 3.- Sensibilidad espectral relativa del ojo humano para visión diurna (Curva C.I.E. fotópica)

La sensibilidad espectral del luxómetro es aproximadamente igual a la que presenta el ojo humano (curva C.I.E. fotópica), figura 3.

La fuente luminosa empleada va a ser una bombilla de tipo halógeno. En las lámparas incandescentes la luz es emitida por un filamento de tungsteno o volframio puesto en incandescencia por el paso de corriente radiando a una temperatura de color entre 2400 K y 2900 K. Cuanto mayor es la potencia de la bombilla mayor es la temperatura de color. Las bombillas halógenas (como la empleada en la práctica) también son de tipo "incandescente" aunque en el interior de su ampolla de vidrio existe una atmósfera gaseosa de halógeno cuya función es evitar que el filamento incandescente se quemara. Con ello se puede alcanzar una mayor temperatura de color, típicamente de 3200 K.

Figura 4 muestra el espectro de radiación de una lámpara de filamento de tungsteno en función de la temperatura de color ( $T_F$ ).

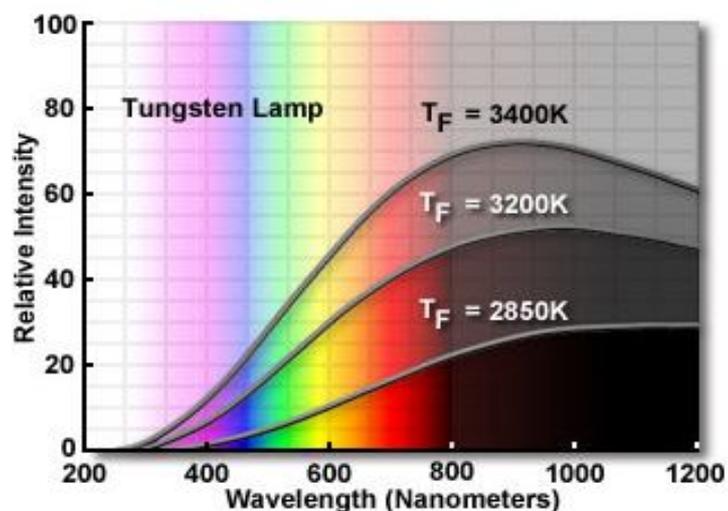


Figura 4.-Espectro de radiación de una lámpara de filamento de tungsteno (el espectro de la bombilla halógena se corresponde aproximadamente con  $T_F = 3200K$ )

**Cuestiones:**

**C1:** Figura 5 muestra la eficiencia de un cuerpo negro radiante en función de su temperatura de color. Vamos a suponer que la bombilla halógena empleada en la práctica tiene una temperatura de color  $T_F = 3200K$ . Su eficiencia aproximada en  $lm/W$  puede obtenerse gráficamente a partir de la figura 5 para su temperatura de color ( $T_F$ ).

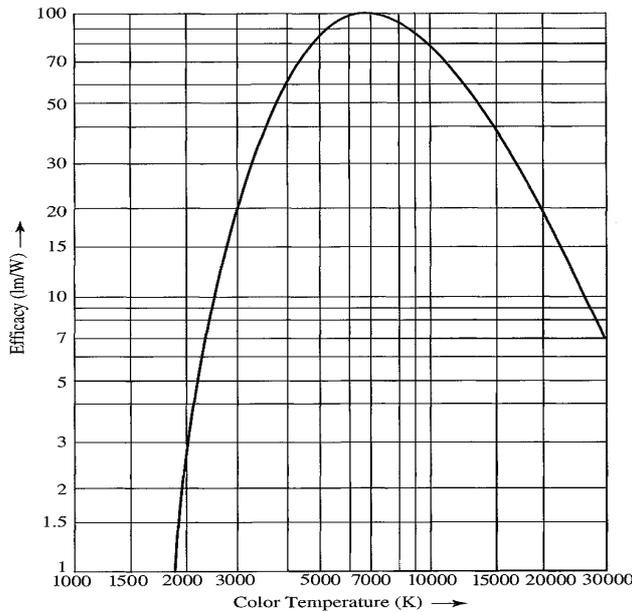


Figura 5.- Eficiencia en función de  $T_F$

Si sobre el luxómetro inciden  $2mW/cm^2$  procedentes de la bombilla halógena, ¿Cuántos lux ( $lm/m^2$ ) marcará?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

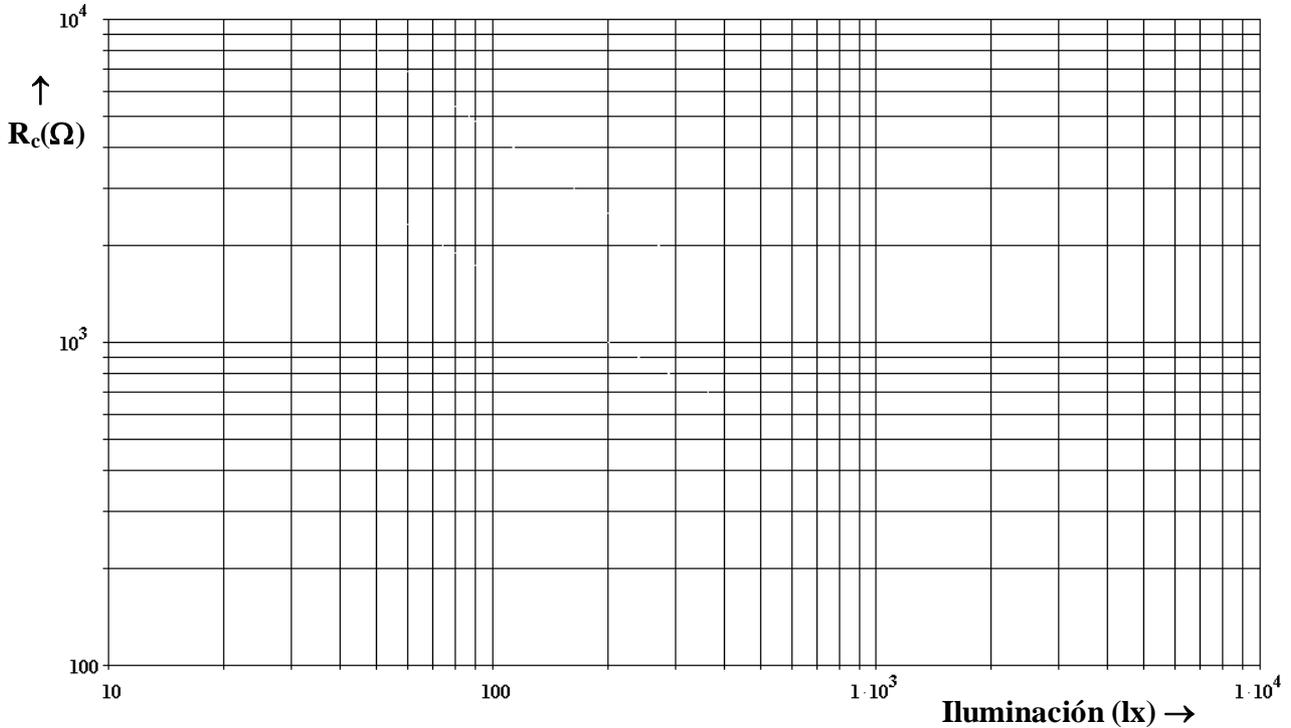
**C2:** Estudiar la variación de las curvas según la iluminación utilizando una bombilla halógena. Tener en cuenta que debido a las oscilaciones de la intensidad luminosa las medidas con el luxómetro no son fáciles de ajustar a un valor concreto y debéis aproximaros al máximo a los valores que se os indican. En las tablas, el carácter “\_” puede ser cualquier número debido a la incertidumbre del luxómetro.

| Iluminación (Lux) | $R_c(\Omega)$ |
|-------------------|---------------|
|                   | NORP12        |
| 0                 |               |
| 5_                |               |
| 10_               |               |
| 15_               |               |
| 20_               |               |
| 25_               |               |
| 30_               |               |
| 35_               |               |
| 40_               |               |
| 50_               |               |
| 60_               |               |
| 80_               |               |
| 10_ _             |               |

| Iluminación (Lux) | $R_c(\Omega)$ |
|-------------------|---------------|
|                   | NORP12        |
| 12_ _             |               |
| 15_ _             |               |
| 20_ _             |               |
| 25_ _             |               |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |

**Aumentar de 500lx en 500lx hasta el valor máximo posible**

Representar gráficamente y en escala logarítmica la curva  $R_c(\Omega)$  en función de la iluminación (lux). A partir de las hojas de características proporcionadas por el fabricante la curva a representar se espera que sea de tipo ..... debido a que la variación de  $R_c(\Omega)$  con la luz es de tipo .....



**C3:** ¿Qué crees que ocurriría si se empleara como fuente luminosa una bombilla de filamento de tungsteno -W- (incandescente) para caracterizar la fotorresistencia? Tener en cuenta la respuesta espectral proporcionada por el fabricante y la figura 4.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

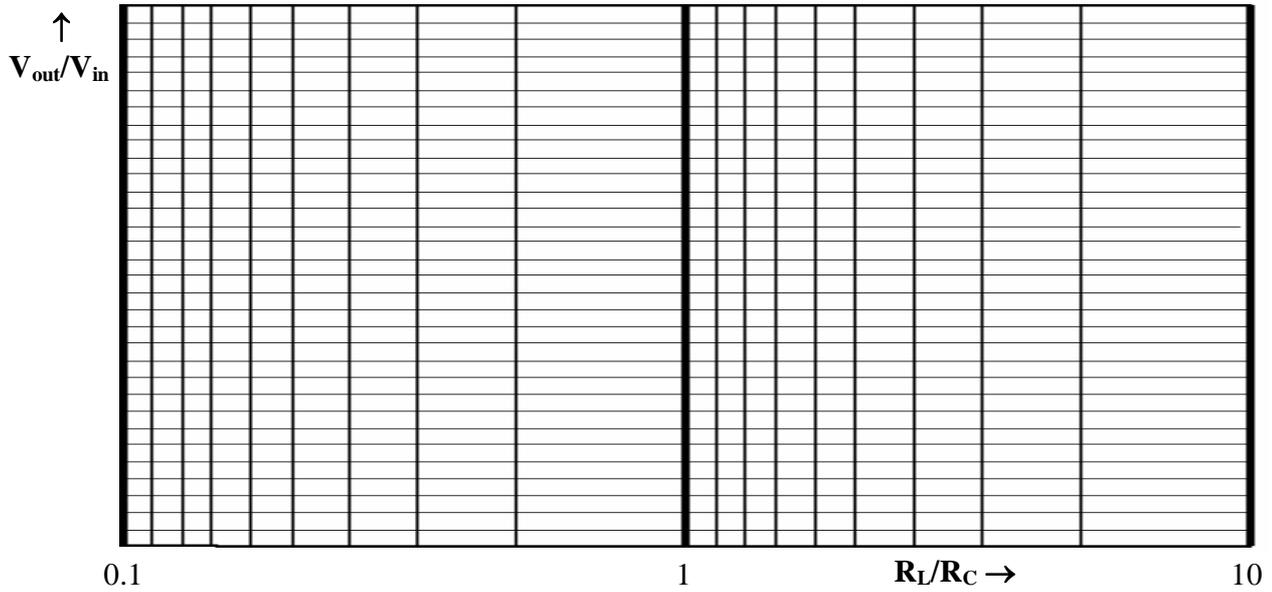
.....

.....

.....



Gráficamente  $V_{out}/V_{in}$  en función de  $R_L/R_C$ :



Comparar con la respuesta teórica prevista, mostrada en Figura 7:

.....

.....

.....

.....

.....

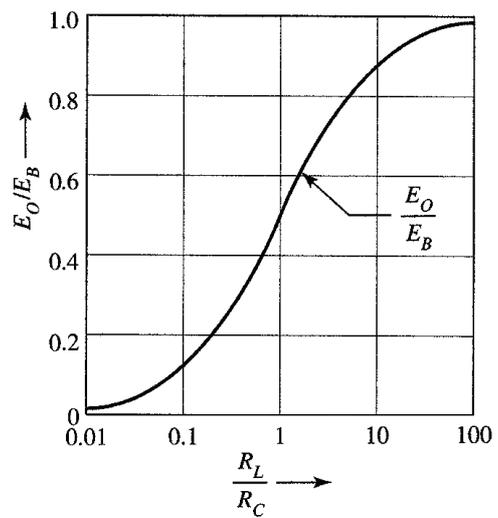
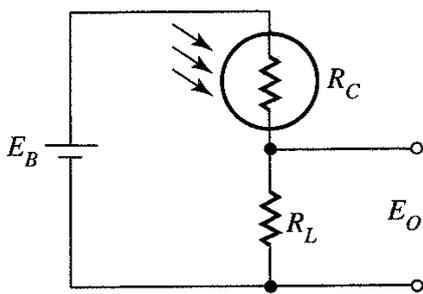
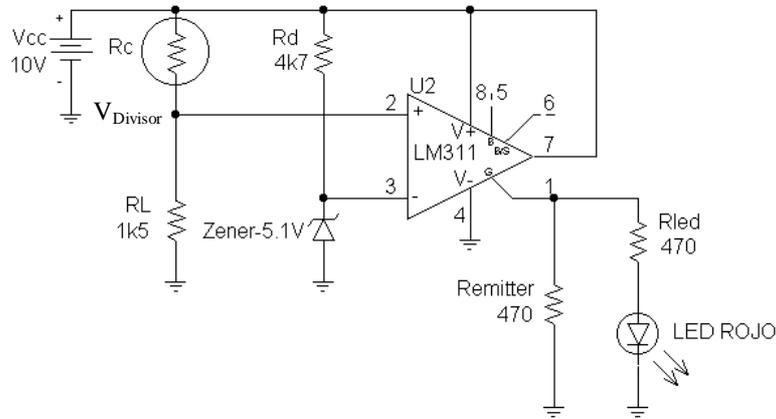


Figura 7.-  $V_{out}/V_{in}$  en función de  $R_L/R_C$ .

**C5:** Como aplicación de la fotorresistencia, diseñar un circuito que encienda o apague un led según sea la iluminación sobre la fotorresistencia:



*Figura 8.- Aplicación de la fotorresistencia como detector de presencia.*

**C5.1:** ¿Cómo funciona el circuito?

.....

.....

.....

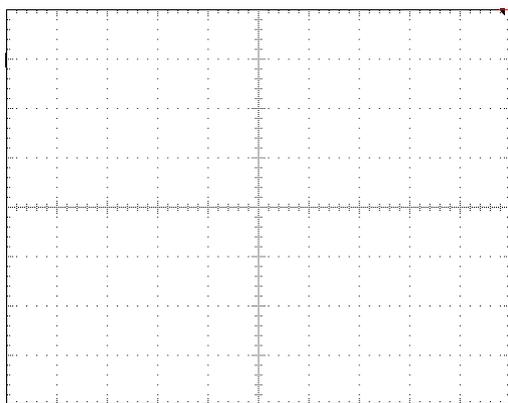
.....

.....

.....

.....

Dibujar la forma de onda en AC en el punto medio del divisor resistivo  $R_c$ - $R_L$ .



CH1:  $V_{Divisor}(AC)$  .....V/div B.T.: 10ms/div

¿A qué se debe la oscilación a 100Hz que aparece en esta forma de onda?

.....

.....

.....

.....

.....

**Fotodiodo:**

Se trata de un diodo de unión PN polarizado inversamente sensible a la luz que incide sobre él que transforma la fuente de energía luminosa en corriente eléctrica. Esto es debido a que la energía incidente continuamente desliga electrones de valencia de sus órbitas con lo cual se generan pares electrón-hueco, que inducen corriente, esta corriente de saturación inversa se controla por la intensidad de la luz que ilumina el diodo. El resultado es una corriente inversa que es proporcional a la intensidad de luz efectiva en el dispositivo; cuanto más intensa es la luz, mayor es la corriente inversa de portadores minoritarios.

El circuito acondicionador está constituido por un convertidor corriente-tensión.

**Conversión corriente – tensión. Amplificador de transimpedancia.**

Dicho amplificador actúa de forma diferente a un amplificador de tensión ideal siendo su función proveer una tensión de salida proporcional a la corriente de entrada. Es muy utilizado como acondicionador de señal de algunos sensores que dan información en forma de intensidad (por ejemplo sensores de temperatura).

Como la impedancia de entrada del operacional es muy grande toda la corriente de entrada  $I_i$  circula por la resistencia de realimentación de manera que  $I_i = I_f$ . Además, puesto que las tensiones en las entradas inversora y no-inversora (conectada a tierra) han de ser iguales, la tensión de salida será  $V_{output} = I_i * R$ .

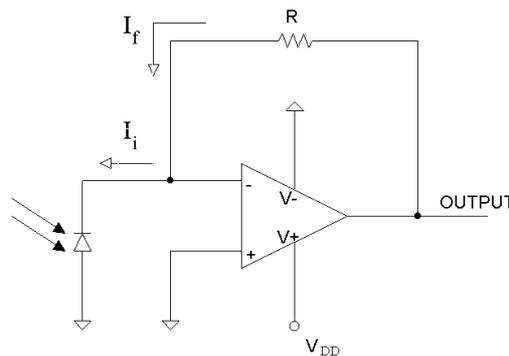
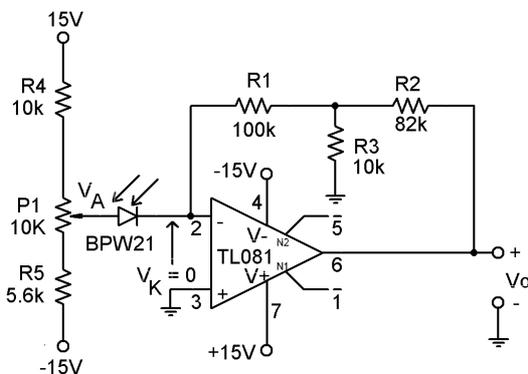


Figura 9.- Amplificador de transimpedancia.

**Cuestiones:**

**C6:** Obtener las curvas características  $I_{AK} - V_{AK}$  en el tercer y cuarto cuadrante y para diferentes valores de iluminación del fotodiodo BPW21. Para ello será necesario realizar el montaje de la figura 10. Se trata de un circuito convertidor corriente-tensión de alta ganancia.



$$I_{AK}(V_o) = -\frac{V_o}{R_{EQ}}$$

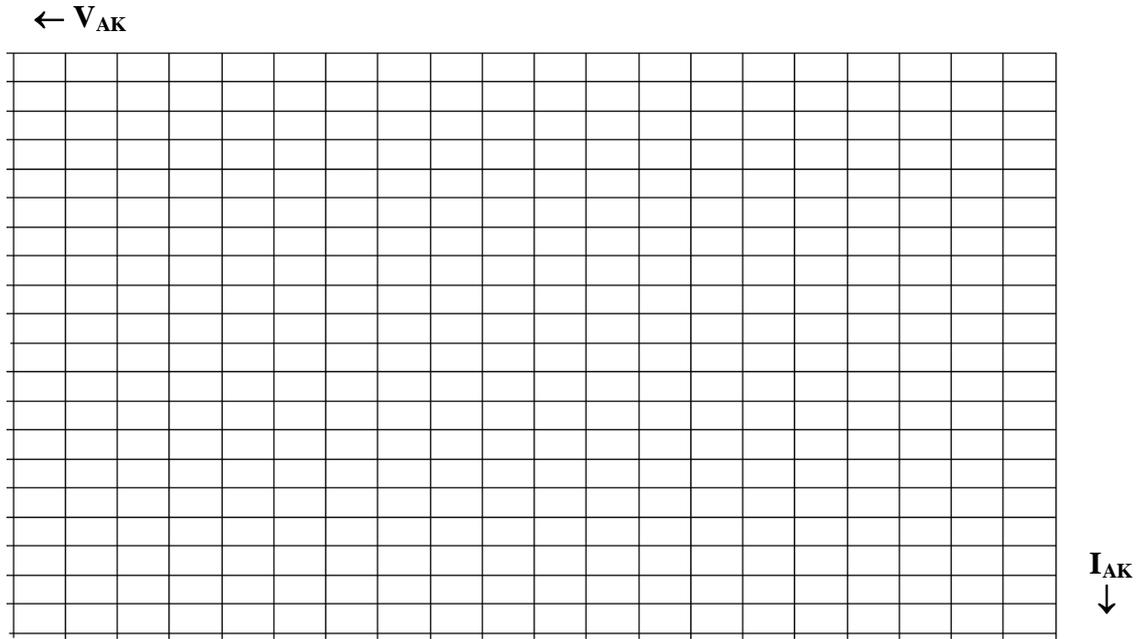
$$V_{AK} = V_A - V_K = V_A$$

$$R_{EQ} = R_1 \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right) + R_2 \cong 1M\Omega$$

Figura 10.- Circuito de acondicionamiento de la señal de salida de un fotodiodo.



Representar gráficamente  $I_{AK}$  frente a  $V_{AK}$  (emplear colores diferentes)



Según el fabricante la sensibilidad del BPW21 es  $5,5 \text{ nA/lx} \leq S \leq 10 \text{ nA/lx}$  para  $V_{AK} = -5V$  ¿Están los resultados obtenidos de acuerdo con esta especificación?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

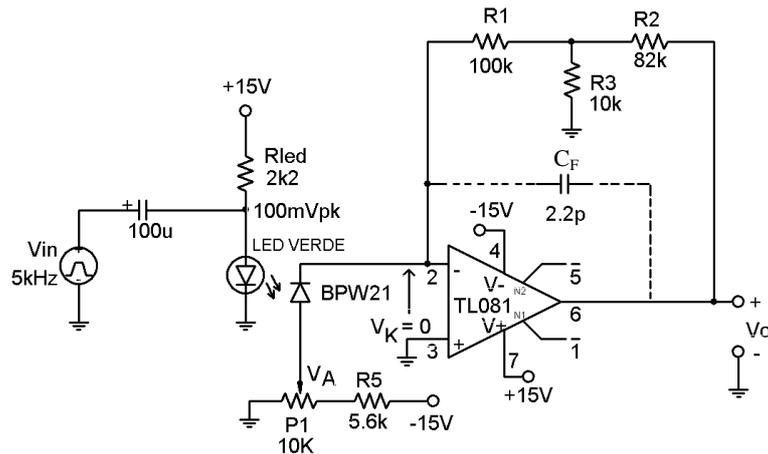
.....

.....

.....

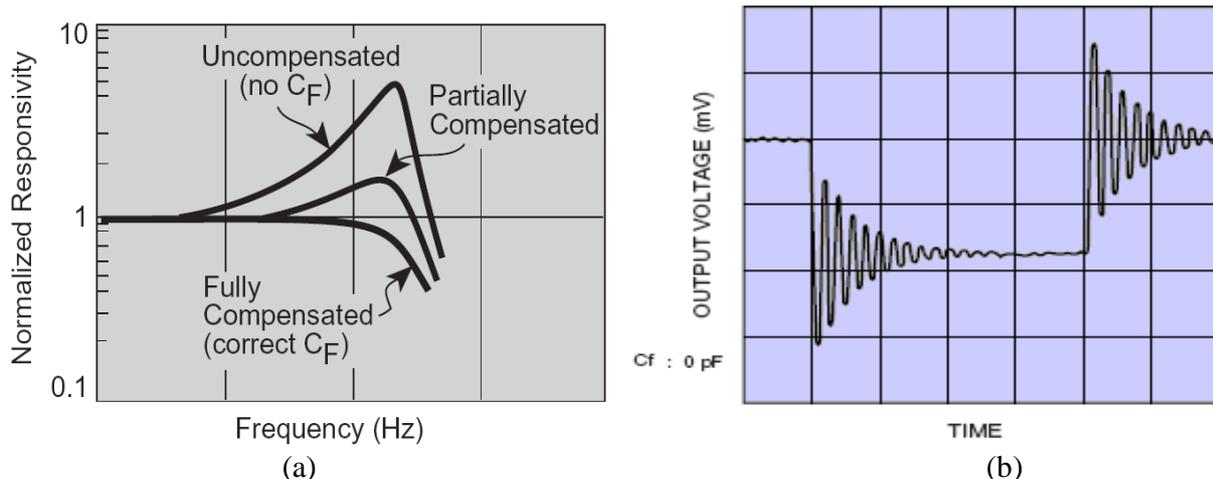
.....

**C7:** A continuación se va a realizar un estudio de la respuesta del fotodiodo ante una señal cuadrada. Para ello se va a emplear el circuito de la figura 10 (aunque sin R4), empleando como fuente luminosa un diodo LED verde tal y como se muestra en la figura 11. El diodo LED deberá estar muy próximo al fotodiodo y bastante alineado con el mismo. Optimizar al máximo el layout (disposición de componentes) pues también afecta a la respuesta del sistema. El generador de funciones del puesto de laboratorio se empleará para generar una onda cuadrada a 5kHz de frecuencia. Su amplitud será tal que la amplitud de pico de la señal AC en ánodo del diodo LED sea de 100 mV. Montar y probar el circuito aislando el par led-fotodiodo del efecto de la iluminación del laboratorio (por ejemplo tapando con la mano el sistema led-fotodiodo).



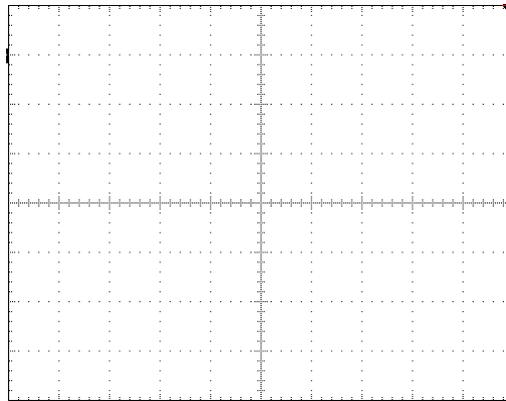
**Figura 11.-** Circuito para comprobar la respuesta del fotodiodo ante una señal cuadrada.

Dado que la fotocorriente es de pequeña amplitud se ha de emplear una resistencia de realimentación de elevado valor. Esto presenta el inconveniente de que cuanto mayor es esta resistencia, menor es el ancho de banda del sistema. Por otra parte, la combinación de la capacidad de unión del fotodiodo ( $C_j$ ) y un elevado valor de la resistencia de realimentación da lugar a un polo en el sistema realimentado. Dicho polo produce un pico a altas frecuencias de la ganancia del sistema, como se observa en figura 12a. El resultado puede llegar a ser, en función de los valores de  $C_j$  y de la resistencia de realimentación, una oscilación amortiguada en la señal amplificada ( $V_o$ ) como se observa en la figura 12b. Dicho efecto puede compensarse con una capacidad  $C_F$  de realimentación que proporcione la compensación de fase necesaria para contrarrestar el efecto del polo de la realimentación, figura 12a.



**Figura 12.-** (a) Ganancia del sistema realimentado. Efecto de  $C_F$ . (b) Tensión de salida del sistema sin  $C_F$ .

Dibujar con colores diferentes las forma de onda de entrada en AC (entre extremos del diodo LED) y de salida ( $V_0$ ) también en AC para  $V_{AK} = -1V$  ( $V_A = -1V$ ) sin  $C_F$ .

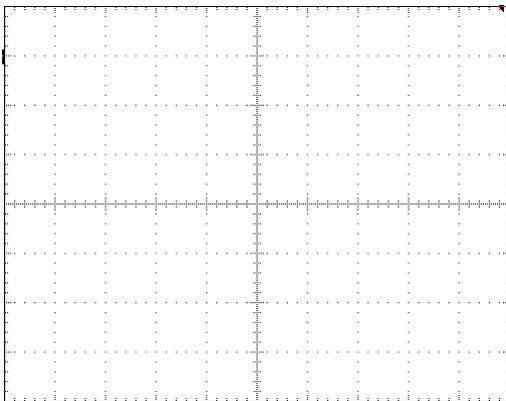


$$V_{AK} = -1V \sin C_F$$

CH1:  $V_{LED}$  (AC) .....V/div B.T.: .....

CH2:  $V_0$  (AC) .....V/div

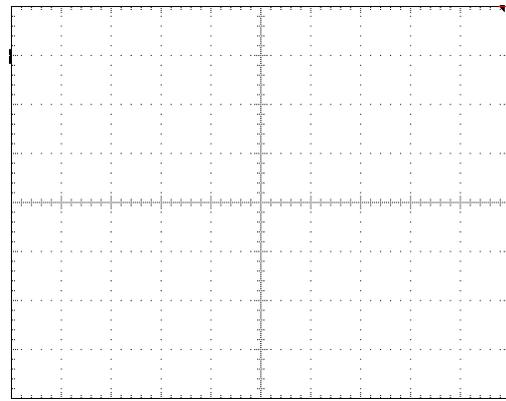
A continuación se va a añadir una pequeña capacidad de compensación,  $C_F$ . Esta capacidad debe seleccionarse de forma cuidadosa ya que tiende a disminuir el ancho de banda del sistema. Dibujar con colores diferentes las forma de onda de entrada en AC (entre extremos del diodo LED) y de salida ( $V_0$ ) también en AC para  $V_{AK} = -1V$  ( $V_A = -1V$ ) con  $C_F = 2,2pF$  y  $C_F = 10pF$ .



$$V_{AK} = -1V; C_F = 2,2pF$$

CH1:  $V_{LED}$  (AC) .....V/div B.T.: .....

CH2:  $V_0$  (AC) .....V/div



$$V_{AK} = -1V; C_F = 10pF$$

CH1:  $V_{LED}$  (AC) .....V/div B.T.: .....

CH2:  $V_0$  (AC) .....V/div

Comentar los resultados obtenidos.

.....

.....

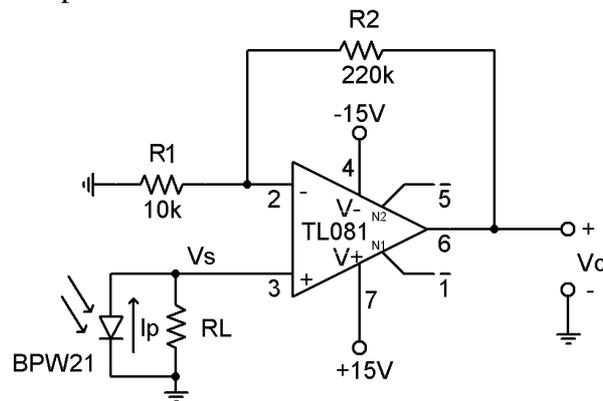
.....

.....

Otra alternativa consiste en seleccionar otro fotodiodo que presente la misma área activa con menor capacidad de unión ( $C_j$ ). Si no existe esa posibilidad, siempre es posible reducir la capacidad de unión del fotodiodo aplicando una tensión de polarización inversa superior.

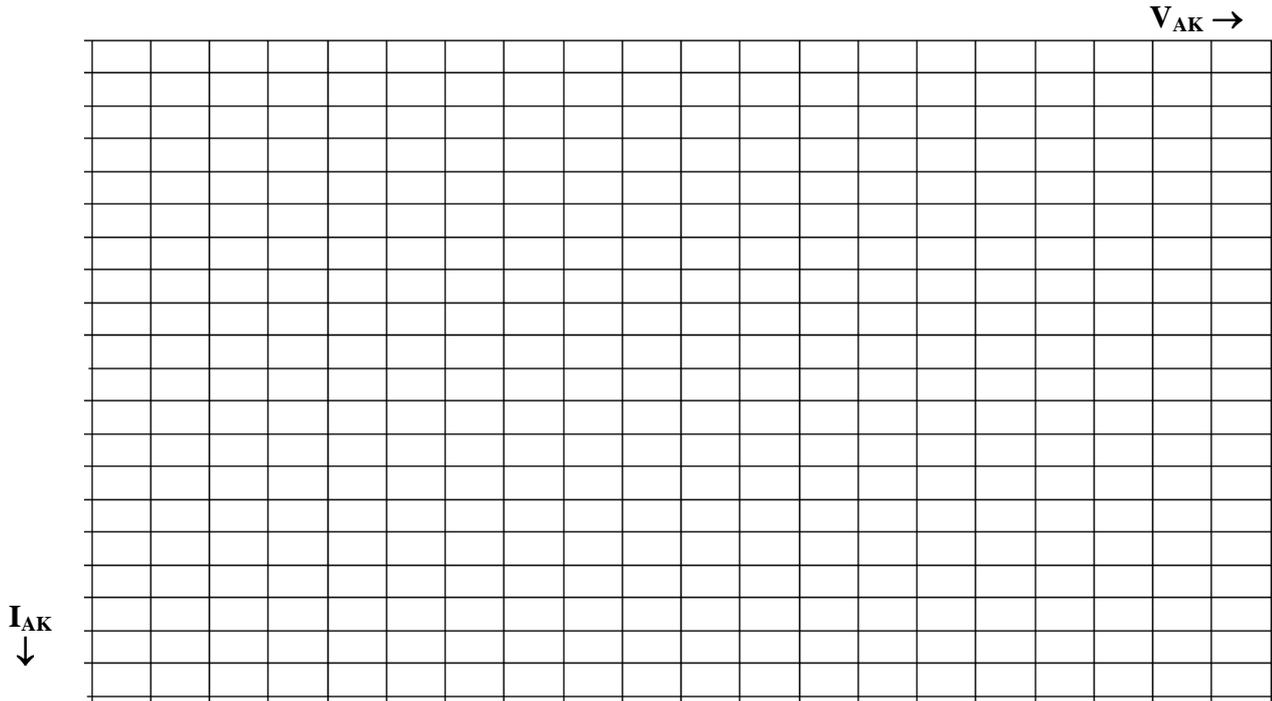
**C8:** Obtener las curvas características  $I_{AK} - V_{AK}$  para una iluminación de 600lx en modo fotoconductor (célula solar) para el fotodiodo BPW21. Para ello será necesario realizar el montaje de la figura 13. Al incidir la luz sobre el fotodiodo genera una diferencia de potencial entre sus extremos ( $V_{AK}=V_s$ ) que sirve para alimentar la carga  $R_L$ . La corriente suministrada a la carga  $R_L$  es  $I_{AK} = -V_s/R_L$ . La tensión  $V_s$  es amplificada por el amplificador operacional en configuración no inversora con una ganancia  $G = 1 + (R_2/R_1)$ .

Para los distintos valores de  $R_L$  tabulados obtendremos los valores de  $V_{AK} = V_s$  y de  $I_{AK}$  que representaremos a continuación para obtener la característica en la zona de célula solar.



**Figura 13.-** Circuito para la caracterización del fotodiodo BPW21 en la zona de célula solar.

| 60_ Lux          |           |               |                     |  |
|------------------|-----------|---------------|---------------------|--|
| $R_L$            | $V_0$ (V) | $V_{AK}$ (mV) | $I_{AK}$ ( $\mu$ A) | $P_{LOAD} = (V_{AK})^2/R_L$ ( $\mu$ W) |
| Circuito abierto |           |               | 0                   | -                                      |
| 150k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 100k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 56k $\Omega$     |           |               |                     |  |
| 22k $\Omega$     |           |               |                     |  |
| 15k $\Omega$     |           |               |                     |  |
| 10k $\Omega$     |           |               |                     |  |
| 8.2k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 6.8k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 5.6k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 4.7k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 3.3k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 2.2k $\Omega$    |           |               |                     |  |
| 1k $\Omega$      |           |               |                     |  |
| 560 $\Omega$     |           |               |                     |  |



Determinar la resistencia para la cual la potencia suministrada es máxima:  $R_{\text{óptima}} = \dots\dots\dots \Omega$

¿Por qué los valores máximos de  $I_{AK}$  son mayores que los obtenidos en el cuarto cuadrante en el apartado C.6 también para 600 lx?

.....

.....

.....

.....

**Fototransistor:**

El fototransistor trabaja como un fotodiodo al que se le ha incorporado un amplificador. Su estructura es como un transistor normal cuya unión base-emisor está formada por una foto unión, por eso algunos encapsulados sólo tienen dos terminales (colector y emisor) comportándose como un transistor en el que la corriente de base es una fotocorriente que proporciona la unión base-emisor. Tiene entre 100 y 500 veces mayor fotosensibilidad que un fotodiodo de las mismas características. Normalmente los fototransistores se usan en configuración de emisor común.

**Cuestiones:**

**C9:** Caracterizar el fototransistor SFH309 obteniendo las curvas  $I_C$ - $V_{CE}$  para diferentes valores de iluminación. Para caracterizarlo se puede utilizar el circuito mostrado en la figura 15:

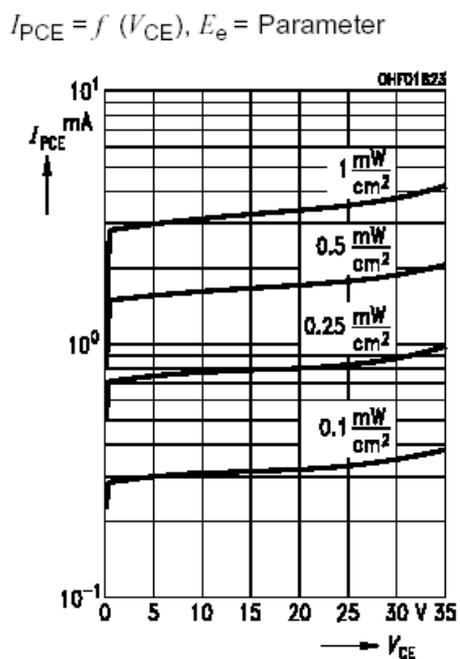


Figura 14.- Curvas características típicas de un fototransistor.

La curva de sensibilidad espectral relativa del SFH309 presenta su máximo en el infrarrojo (860nm). En consecuencia, si sobre fototransistor y luxómetro inciden los mismos  $\text{mW/cm}^2$  procedentes del foco halógeno (ver figura 4), el luxómetro únicamente responderá a la fracción de la radiación contenida dentro del visible mientras que el fototransistor lo hará en mayor proporción al estar el máximo de emisión del foco halógeno también en el infrarrojo.

Aunque el fototransistor no responde únicamente a la radiación contenida en el visible se van a emplear para su caracterización tres niveles distintos de iluminación. Si la iluminación aumenta también lo hace la cantidad de radiación ( $\text{mW/cm}^2$ ) a la cual responde el fototransistor.

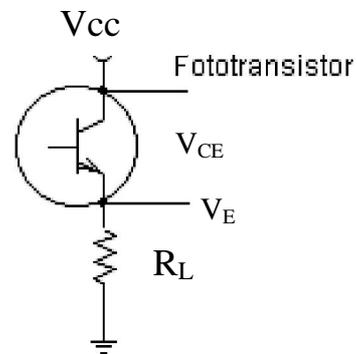


Figura 16.- Configuración de un fototransistor en emisor común.

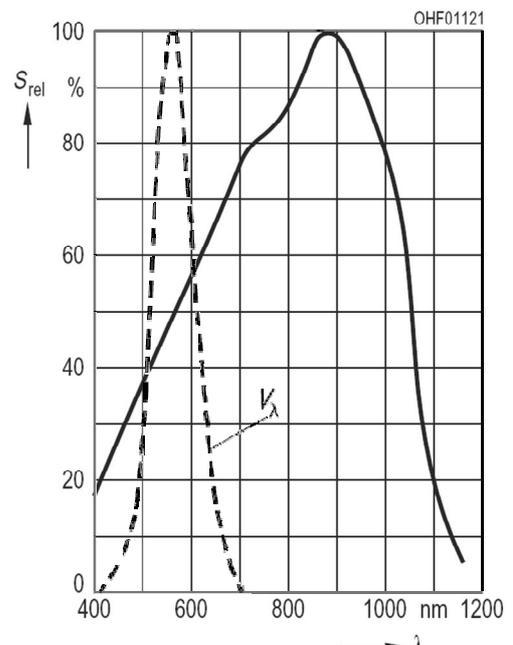
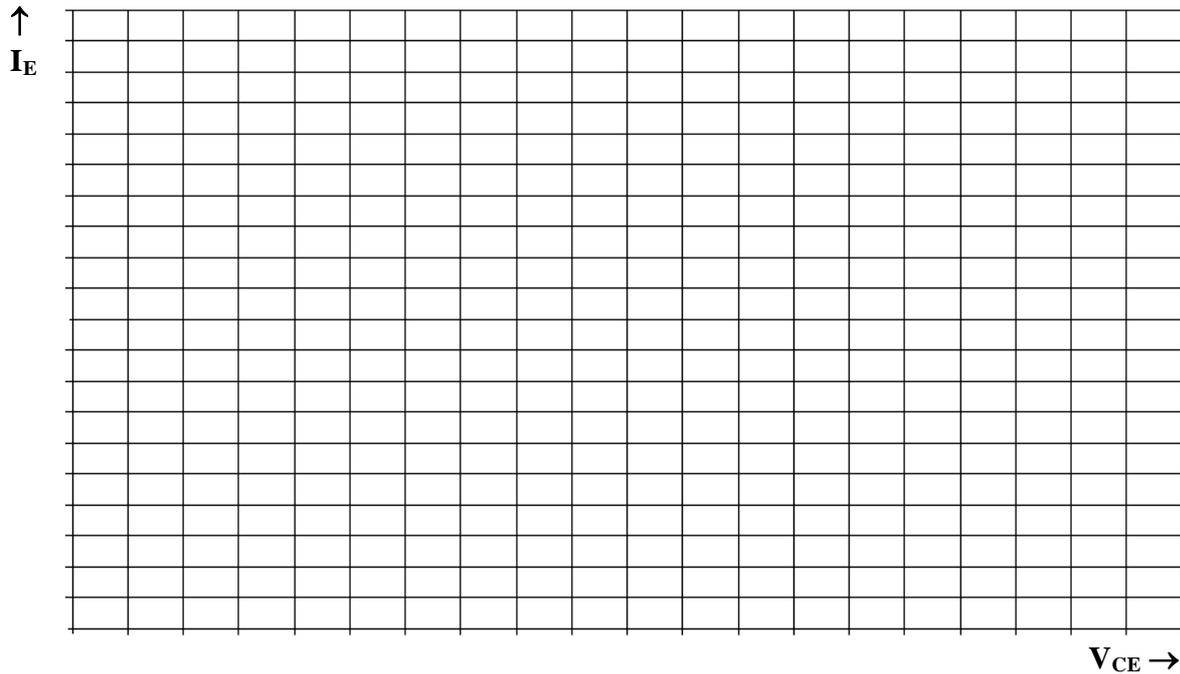


Figura 15 - Sensibilidad espectral relativa del fototransistor SFH309 y la aproximada del luxómetro ( $V_\lambda$ ).

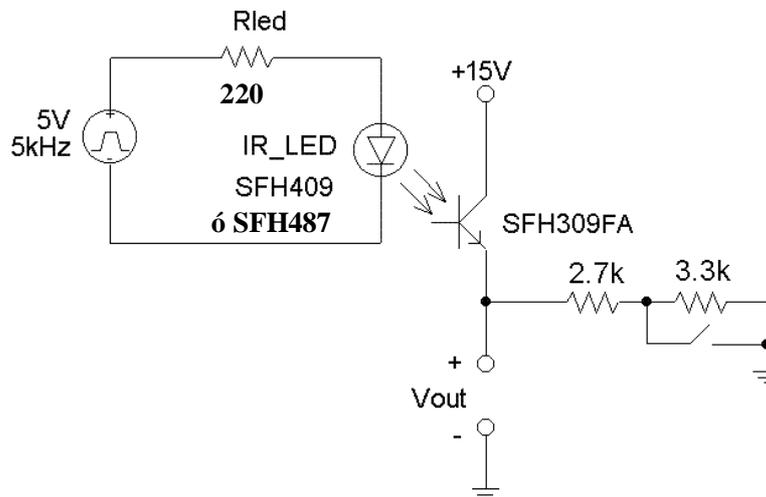
El carácter “\_” puede ser cualquier número debido a la incertidumbre del luxómetro.

| $R_L=3.9\text{ k}\Omega$ |           |              |            |           |              |            |
|--------------------------|-----------|--------------|------------|-----------|--------------|------------|
| Iluminación              |           |              |            |           |              |            |
| 50_ lux                  |           |              |            | 10_ _ lux |              |            |
| $V_{CC}$ (V)             | $V_E$ (V) | $V_{CE}$ (V) | $I_E$ (mA) | $V_E$ (V) | $V_{CE}$ (V) | $I_E$ (mA) |
| 0                        |           |              |            |           |              |            |
| 2                        |           |              |            |           |              |            |
| 4                        |           |              |            |           |              |            |
| 6                        |           |              |            |           |              |            |
| 8                        |           |              |            |           |              |            |
| 10                       |           |              |            |           |              |            |
| 12                       |           |              |            |           |              |            |
| 14                       |           |              |            |           |              |            |
| 16                       |           |              |            |           |              |            |
| 18                       |           |              |            |           |              |            |
| 20                       |           |              |            |           |              |            |
| 25                       |           |              |            |           |              |            |
| 30                       |           |              |            |           |              |            |

Representar gráficamente,  $I_E$  frente a  $V_{CE}$ :



**C10:** A continuación se va a realizar un estudio de la respuesta del fototransistor de infrarrojos SFH309FA ante un impulso escalón en función de la resistencia de carga  $R_L$ . Realizar el montaje de la figura 17 empleando para el circuito emisor el IR LED SFH409 o el SFH487. Dado que se trata de radiación infrarroja el circuito puede ser montado y probado su funcionamiento sin necesidad de aislarlo de la iluminación del laboratorio. La forma de onda del generador de funciones será una señal cuadrada de 5V de amplitud (entre +5V y 0V) y 5kHz de frecuencia.



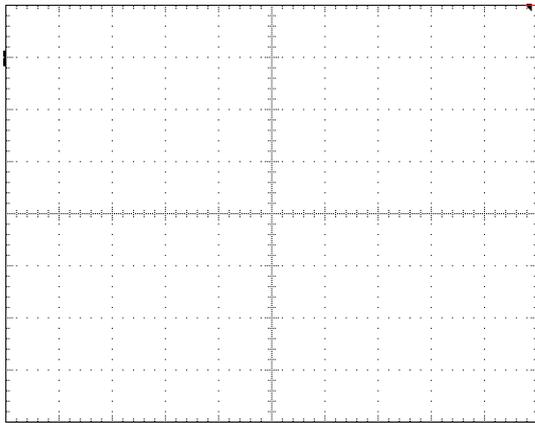
*Figura 17.- Circuito emisor - receptor de infrarrojos con fototransistor.*

La cantidad de radiación incidente depende de la amplitud de la señal cuadrada, de  $R_{led}$  y de la distancia y disposición relativa del sistema IR\_led – fototransistor. Mantener invariables estos parámetros para que las medidas se correspondan con un mismo nivel de radiación incidente.

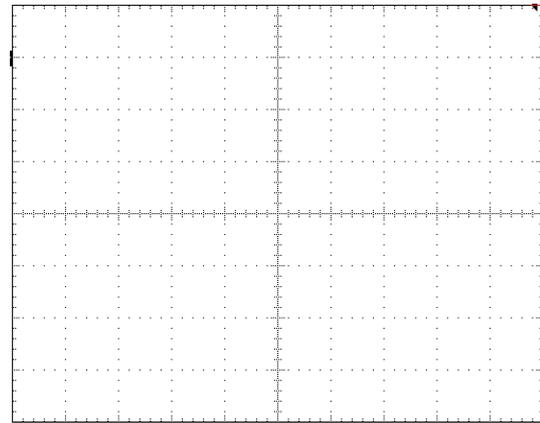
Cuando se emplea un fototransistor en conmutación hay que tener en cuenta que se han de cargar las capacidades asociadas con el circuito de base para que el fototransistor llegue al estado de corte. Un

incremento en el valor de la resistencia de carga aumenta la constante de tiempo RC aumentando el valor del tiempo de subida (paso a corte) de la tensión entre colector y emisor del fototransistor.

Dibujar en cada gráfica la forma de onda entre extremos de la resistencia de carga ( $V_{out}$ ) para su valor máximo ( $6k\Omega$ ) y mínimo ( $2.7k\Omega$ ), conjuntamente con la forma de onda de entrada (en extremos del diodo LED).


 $R_{Lmin}$ 

 CH1:  $V_{LED}$  ..... V/div B.T.: .....

 CH2:  $V_{out}$  ..... V/div

 $R_{Lmax}$ 

 CH1:  $V_{LED}$  ..... V/div B.T.: .....

 CH2:  $V_{out}$  ..... V/div

- Indicar en cada caso el tiempo de subida ( $t_r$ ) –paso a corte- de la forma de onda de  $V_{CE}$  del fototransistor. Dicho intervalo de tiempo se corresponde con el tiempo de bajada (del 90 al 10% del valor máximo) en la forma de onda de  $V_{out}$  y nos da una idea de la rapidez en la respuesta del sistema:

$$R_{Lmin} = 2.7 \text{ k}\Omega$$

$$t_f(V_{out}) = t_r(V_{CE}) = \dots \mu\text{s}$$

$$R_{Lmax} = 6 \text{ k}\Omega$$

$$t_f(V_{out}) = t_r(V_{CE}) = \dots \mu\text{s}$$

Una respuesta rápida del sistema permite un funcionamiento a mayores frecuencias. A partir de los resultados obtenidos la respuesta es más rápida cuando la resistencia de carga  $R_L$  es ..... (responder alta ó baja).

**C11:** Ver si su respuesta mejora con la siguiente configuración en que se emplea un transistor en base común:

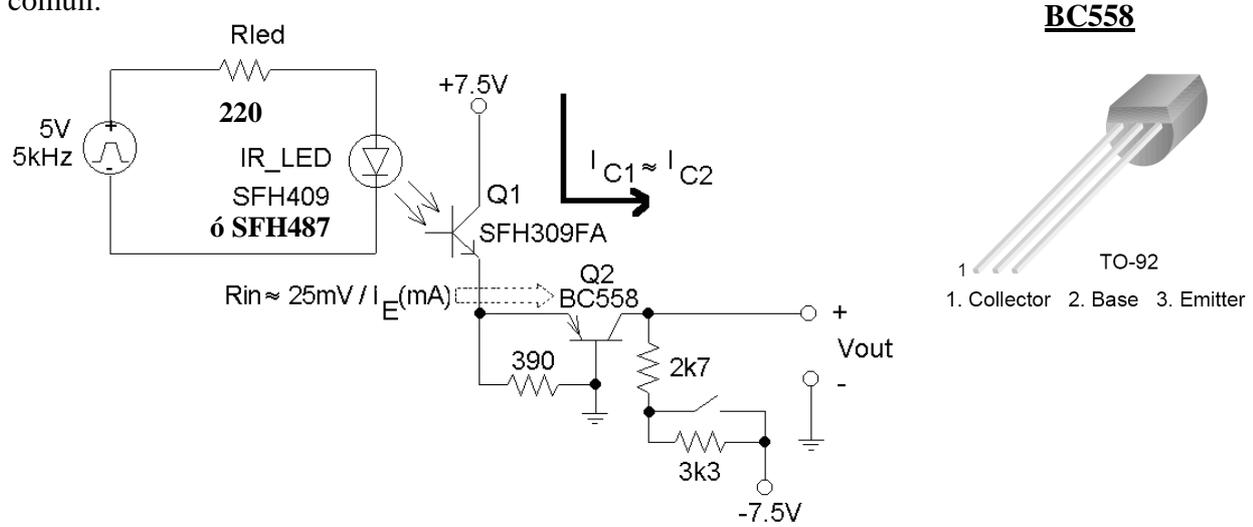
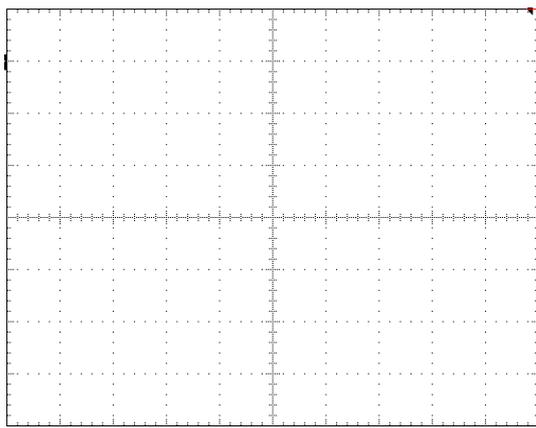
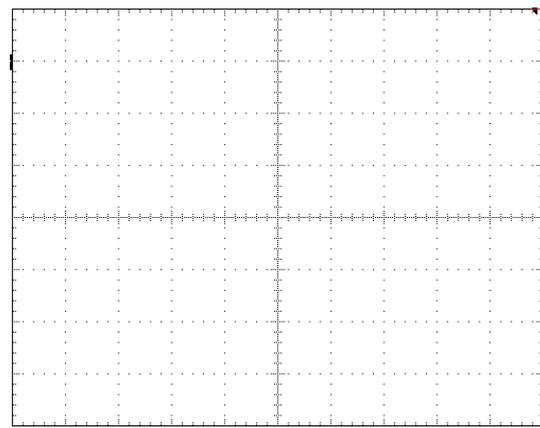


Figura 18.- Circuito con fototransistor para alta frecuencia.



$R_{Lmin}$

CH1:  $V_{LED}$  ..... V/div B.T.: .....  
 CH2:  $V_{out}$  (AC) ..... V/div



$R_{Lmax}$

CH1:  $V_{LED}$  ..... V/div B.T.: .....  
 CH2:  $V_{out}$  (AC) ..... V/div

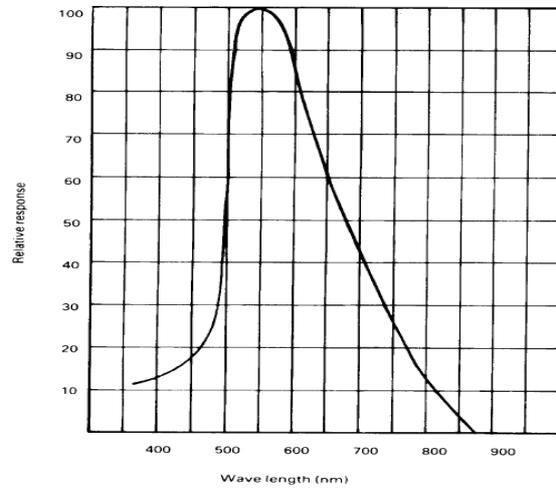
- Medir el tiempo de bajada (del 90 al 10% del valor máximo) en la forma de onda de  $V_{out}$ . Este está relacionado con el tiempo de subida –paso a corte- de la forma de onda de  $V_{CE}$  del fototransistor y nos da una idea de la rapidez en la respuesta del sistema:

$$R_{Lmin} \\ t_f = \dots \mu s$$

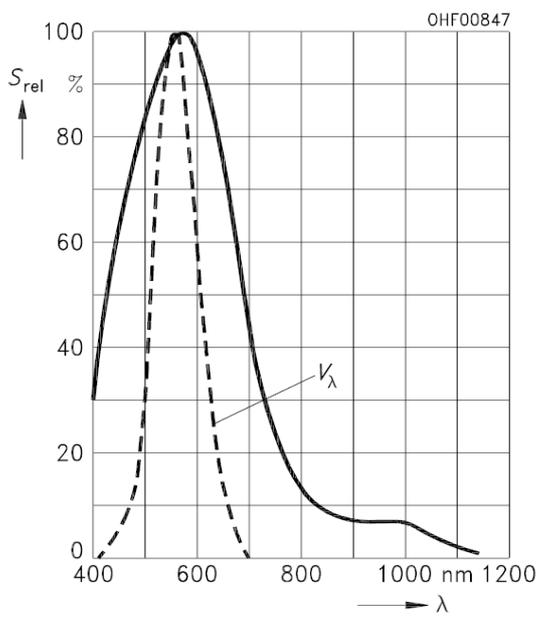
$$R_{Lmax} \\ t_f = \dots \mu s$$

En esta configuración la resistencia efectiva de emisor ( $R_{in}$ ) del SFH309FA es la impedancia de entrada de una configuración en base común. Dicha impedancia de entrada es muy baja y únicamente sufre una pequeña variación al variar la corriente de emisor con  $R_L$ .

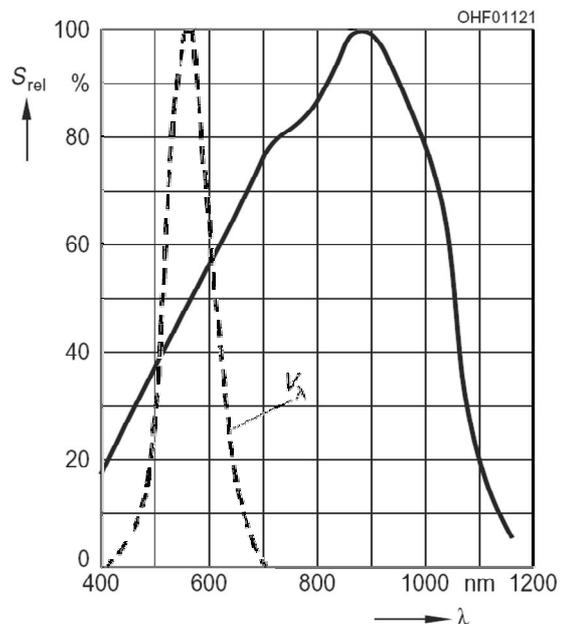
**SENSIBILIDADES ESPECTRALES RELATIVAS**



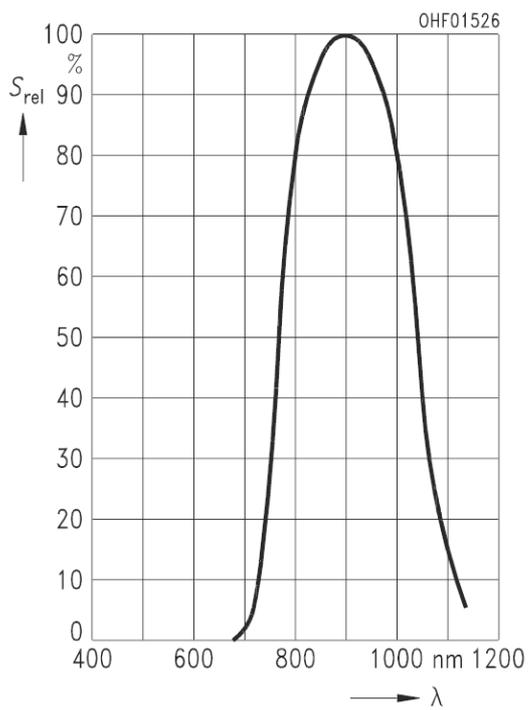
**Fotorresistencia NORP12**



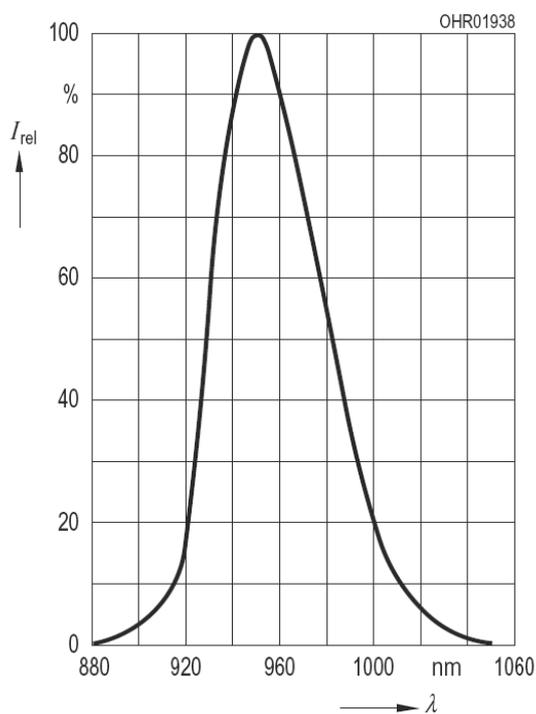
**Fotodiodo BPW21**



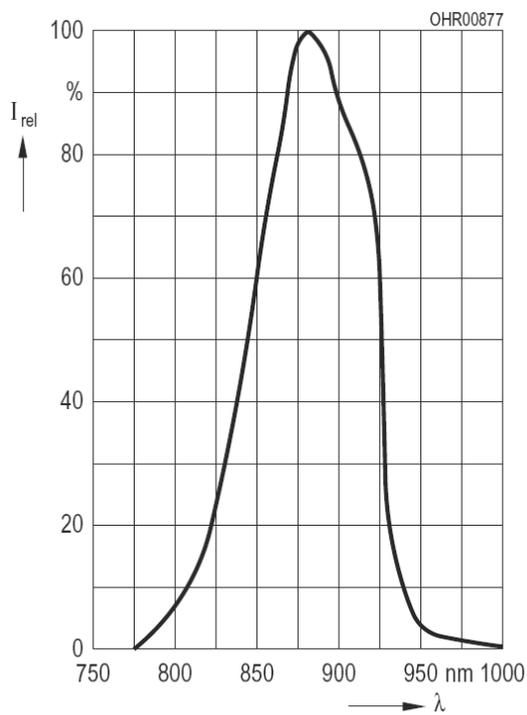
**Fototransistor SFH309**



**IR Fototransistor SFH309FA**



**IR LED SFH409**



**IR LED SFH487**