

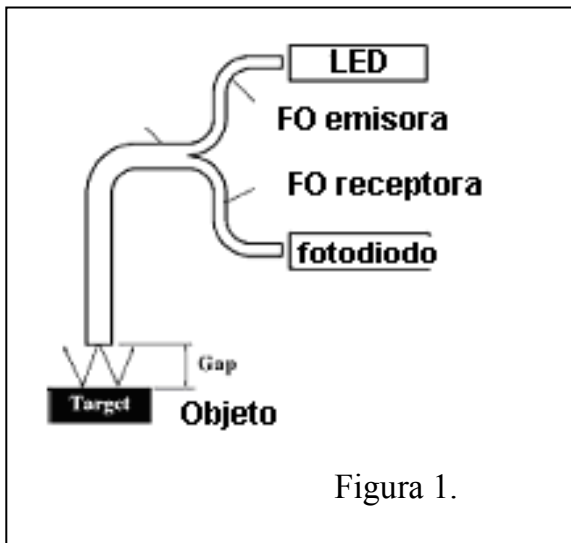
## Ejercicios de repaso con soluciones

### Sensores ópticos

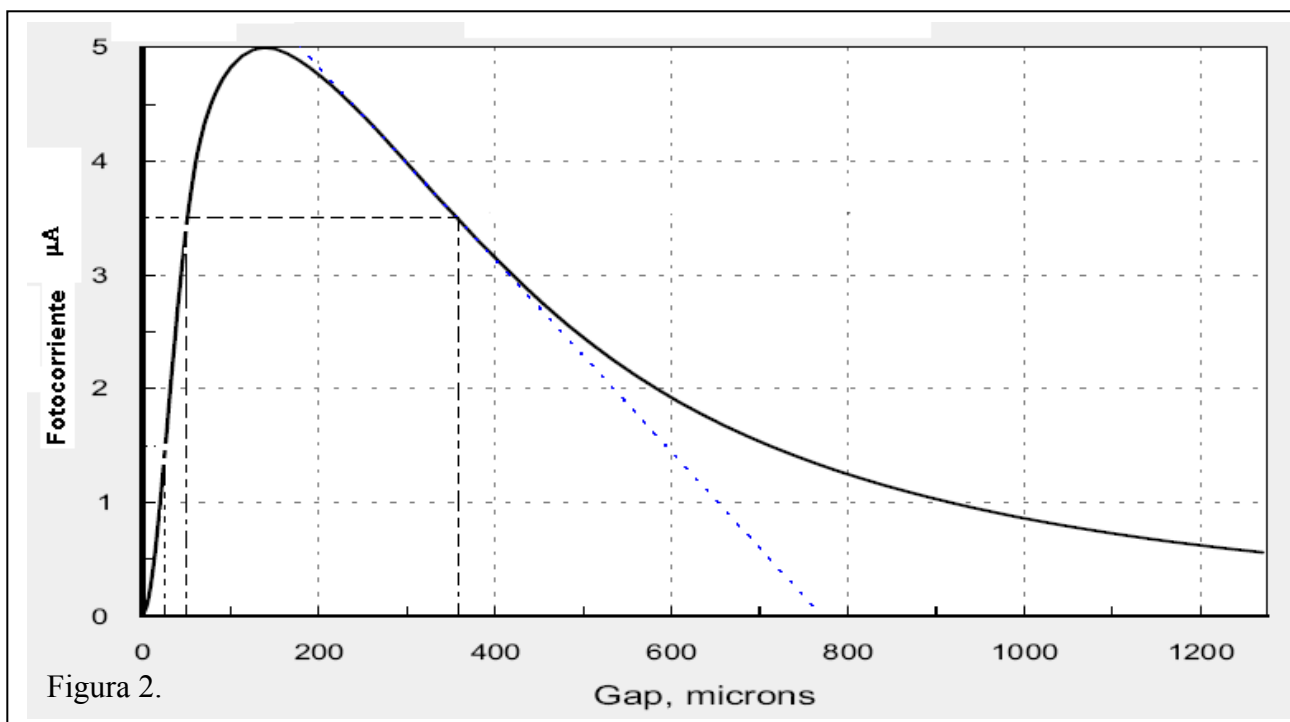
#### Problema 1

En la figura 1 se muestra el esquema de un sensor de fibra óptica (FO) para medir desplazamientos, mientras que en la figura 2 se muestra su curva de calibración (corriente fotogenerada,  $i_f$ , frente a la variación del gap o distancia al objeto). Toda la luz del emisor que se acopla a la FO se envía al objeto, mientras que la luz de vuelta llega al fotodiodo a través de la FO receptora. Como fuente de luz se utiliza un LED IF-E97.

Se pide:



1. Explique el funcionamiento del sensor e indique un tipo de FO que se puede utilizar en el mismo.
2. Diseñe el circuito de excitación del LED si se desea que emita una luz de  $325\mu\text{W}$  a  $660\text{nm}$ , a partir de los datos de la figura 3.
3. Determine la sensibilidad del sensor de FO en  $\text{nA}/\mu\text{m}$ , para un rango de  $25$  a  $50\mu\text{m}$  y de  $200$  a  $400\mu\text{m}$ , a partir de la curva de calibración que se adjunta.
4. Explique brevemente el funcionamiento del circuito acondicionador representado en la figura 4, indicando sus etapas. Calcule  $V_o=f(R_G, V_{\text{ref}}, i_f)$  y determine los valores de  $R_G$  y  $V_{\text{ref}}$  necesarios en el circuito de forma que para desplazamientos de  $200$  a  $400\mu\text{m}$  se obtengan tensiones de  $5$  a  $0\text{V}$ .
5. Si se cambia el LED por una fuente de luz que acopla la misma potencia en la FO emisora, pero con una longitud de onda de  $850\text{nm}$  ¿hay que hacer alguna modificación en el sistema para que funcione correctamente? En caso afirmativo, indique al menos 2 cambios necesarios.



CHARACTERISTICS ( $T_A=25^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Peak Wavelength	$\lambda_{\text{PEAK}}$	650	660	670	nm
Spectral Bandwidth (50% of $I_{\text{MAX}}$ )	$\Delta\lambda$	-	40	-	nm
Output Power Coupled into Plastic Fiber (1 mm core diameter). Distance Lens to Fiber $\leq 0.1$ mm, 1 m polished fiber, $I_F=20$ mA	$\Phi_{\text{min}}$	250 -6	325 -49	425 -4	$\mu\text{W}$ dBm
Switching Times (10% to 90% and 90% to 10%) ( $I_F=20$ mA)	$t_r, t_f$	-	.5	-	$\mu\text{s}$
Capacitance (F=1 MHz)	$C_0$	-	30	-	pF
Forward Voltage ( $I_F=20$ mA)	$V_f$	-	-	1.7	V
Temperature Coefficient, $\lambda_{\text{PEAK}}$	$\text{TC}_\lambda$		0.2		nm/K

Figura 3. Características IF-E97

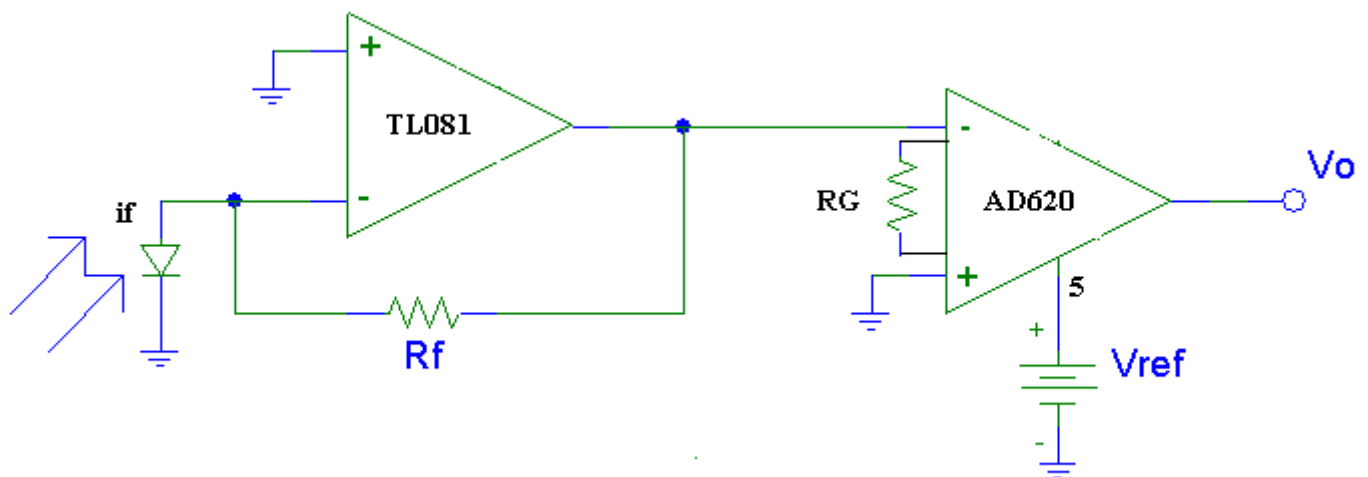


Figura 4. Circuito acondicionador de la etapa receptora

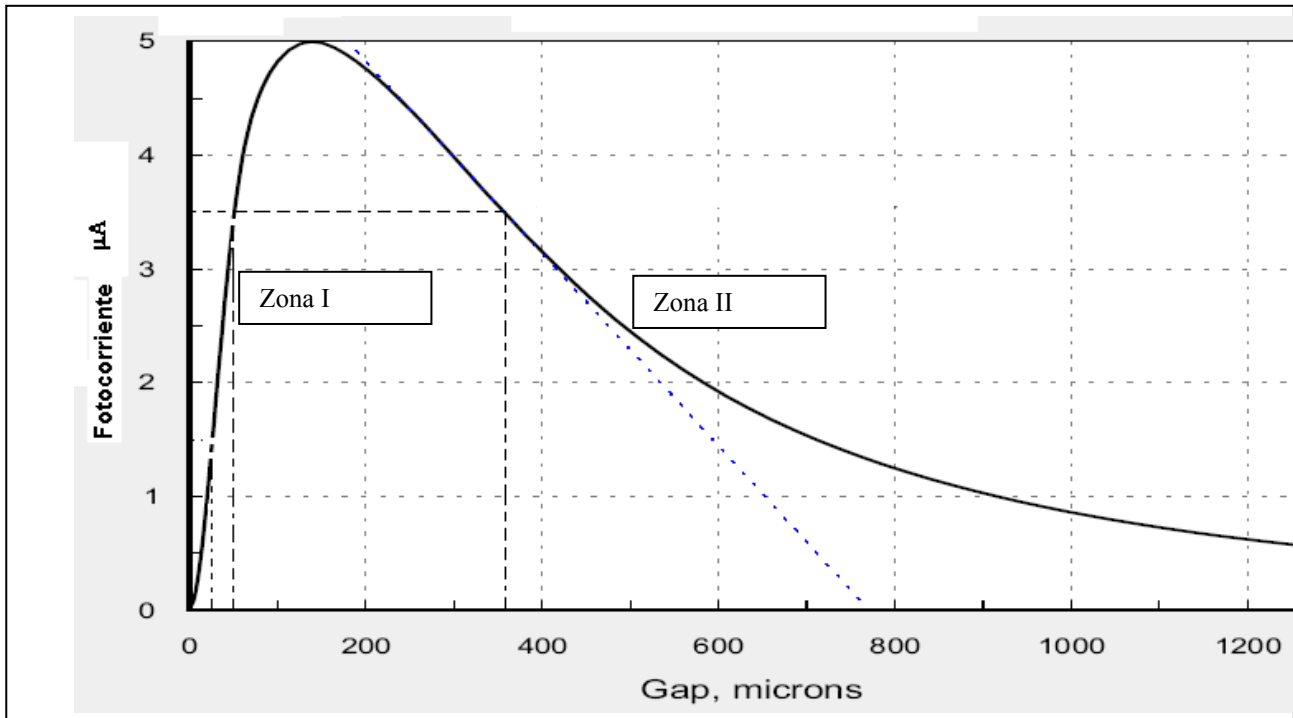
**Nota:**  $R_f = 1\text{M}\Omega$

$V_o(\text{AD620}) = G(R_G)(V_+ - V_-) + V_5$ ; con  $G(R_G) = 1 + 49,4\text{K}\Omega/R_G$

**Solución**

Se trata de un sensor de FO de intensidad, en reflexión. La potencia óptica que emite el LED y se propaga por la FO emisora hasta llegar a la superficie del objeto a detectar, donde se refleja y parte de la luz reflejada se acopla en la FO receptora que la lleva hasta el fotodiodo, para generar una corriente proporcional a la misma. Así pues la potencia óptica que llega al fotodetector, y por tanto, la corriente fotogenerada, varía en función de la distancia entre el extremo de la FO y el objeto y por tanto en función del desplazamiento. Hay dos zonas de funcionamiento I y II:

- Zona I: La potencia óptica que incide en el fotodiodo y por tanto la corriente fotogenerada, aumenta con el aumento del desplazamiento o separación del objeto,
- Zona II: La potencia óptica que incide en el fotodiodo y por tanto la corriente fotogenerada, disminuye con el aumento del desplazamiento o separación del objeto,



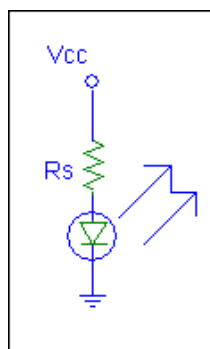
La FO a utilizar debe presentar un mínimo de atenuación a la longitud de onda que emita la fuente de luz, en este caso, en la hoja de características del IF-E97, se observa que emite en el visible, alrededor de 660nm, luz roja, luego una FO adecuada sería la FO de plástico convencional con 0,2dB/m a 650nm.

2.

Hay múltiples circuitos de excitación del LED, en todos ellos se debe cumplir:

- a. El LED debe estar polarizado en directa
- b. La potencia que emite el LED se fija con la corriente en directa,  $I_F$ , que circula por él.

Un circuito muy sencillo está formado por un LED en serie con una resistencia  $R_s$  que limita la corriente que por él circula:



En este caso se deben especificar los valores de  $V_{cc}$  y  $R_s$ . Para ello se deben extraer los siguientes datos de la hoja de características:

- c.  $I_F$  necesaria para que el LED emita  $325\mu W$ , a 660nm, a partir de figura 3, en la tercera fila de datos de la tabla, vemos que  $I_F=20mA$ ,
- d. la caída de tensión en directa del LED que para la corriente anterior es  $V_F=1,7v$  ( se han elegido los valores típicos)

Por tanto si suponemos una alimentación  $V_{cc}=5V$ ,  $R_s=(V_{cc}-V_F)/I_F=(5-1,7)v/20mA=165\Omega$

Otras posibilidades: circuito autopolarizado, autopolarizado con A.O realimentado negativamente, para estabilizar el punto de polarización con alimentación estabilizada a través de un zéner.



3.

La sensibilidad del sensor se obtiene a partir de su curva de calibración, que vemos varía en los 2 rangos que nos piden calcular la misma, pues cada rango se encuentra en una zona distinta de funcionamiento:

- a. Para “gaps”, que denominaremos  $d$ , de 25 a 50  $\mu\text{m}$ , el comportamiento es más o menos lineal, luego debemos calcular la pendiente de la curva que será una constante, tomando 2 puntos cualesquiera. Si elegimos los extremos, a partir de la figura 2, tenemos:
  - i.  $S_I = \Delta i_f / \Delta d = (3,2 - 1,5) \mu\text{A} / (50 - 25) \mu\text{m} = 1,7 \mu\text{A} / 25 \mu\text{m} = 68 \text{nA} / \mu\text{m}$
- b. Con rangos de  $d$  de 200 a 400  $\mu\text{m}$ , el comportamiento es más o menos lineal, luego procedemos como en el caso anterior. Si elegimos los extremos tenemos:
  - i.  $S_{II} = \Delta i_f / \Delta d = (4,65 - 3,15) \mu\text{A} / (200 - 400) \mu\text{m} = 1,5 \mu\text{A} / 200 \mu\text{m} = -7,5 \text{nA} / \mu\text{m}$

4.

El circuito representado en la figura 4, es el circuito acondicionador de la etapa receptora y está compuesto por los siguientes bloques:

- a. Fotodiodo, sensor óptico que convierte la potencia luminosa recibida, proporcional al desplazamiento a medir en corriente.
- b. Conversor I-V, para convertir la corriente fotogenerada en tensión a través del amplificador de transimpedancia compuesto por el A.O. realimentado negativamente a través de  $R_f$ .
- c. Amplificador de instrumentación, luego es un amplificador diferencial, aunque no es necesario el uso de amplificación diferencial en este caso, presenta la ventaja de amplificar con gran precisión, tiene corrientes de offset pequeñas y permite además introducir una tensión de offset a través de la patilla 5 y el control de la ganancia a través de una resistencia externa. En esta etapa por tanto se eleva el nivel de la señal de tensión de la etapa previa y se introduce un nivel de continua para poder ajustar los valores de la tensión de salida entre los niveles deseados para un cierto rango de variación de la señal de entrada.

Con respecto al cálculo de la tensión de salida:

- a. En el conversor I-V, suponiendo el A.O. ideal y por tanto sus corrientes de entrada son nulas y dado que existe realimentación negativa y por tanto un cortocircuito virtual entre sus entradas y estando  $V_+$  conectada a tierra, se cumple:
  - i.  $V_{o1} = -i_f \times R_f$
- b. En el amplificador de instrumentación, según se indica en la nota, se cumple:
  - i.  $V_o = [(0 - V_{o1}) \times G(R_G)] + V_5 = (i_f \times R_f) \times (1 + 49,4 \text{K}\Omega / R_G) + V_{ref}$ ;

Operando con las expresiones anteriores y a partir de los datos de la figura 4, se obtiene:

$$V_o = (i_f \times 1 \text{M}\Omega) \times (1 + 49,4 \text{K}\Omega / R_G) + V_{ref} \quad (1)$$

Para calcular los valores de  $R_G$  y  $V_{ref}$ , a partir de la ecuación (1) y sustituyendo para que se cumplan las especificaciones del enunciado en el rango de 200 a 400  $\mu\text{m}$ , se plantea el siguiente sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas, con  $\xi = 49,4 \text{K}\Omega / R_G$ :

$$\begin{aligned} 0 \text{ v} &= (3,15 \mu\text{A} \times 1 \text{M}\Omega) \times (1 + \xi) + V_{ref} \\ 5 \text{ v} &= (4,65 \mu\text{A} \times 1 \text{M}\Omega) \times (1 + \xi) + V_{ref} \end{aligned}$$

Para despejar se restan ambas ecuaciones y se elimina la dependencia con  $V_{ref}$ , obteniéndose el valor de  $\xi$ :

$$-5 \text{ v} = (3,15 - 4,65) \mu\text{A} \times 1 \text{M}\Omega \times (1 + \xi); \text{ luego } \xi = (5 / 1,5) - 1 = 2,3; \text{ luego } R_G = 49,4 \text{K}\Omega / \xi = \mathbf{21,5 \text{K}\Omega}$$

Para obtener el valor de  $V_{ref}$ , sustituimos este valor de  $\xi$  en cualquiera de las 2 ecuaciones anteriores, obteniendo:

$$0 \text{ v} = (3,15 \mu\text{A} \times 1 \text{M}\Omega) \times (1 + 2,3) + V_{ref}; \mathbf{V_{ref} = -10,4 \text{V}}$$

5.

Si se modifica la longitud de onda de la fuente de luz, esto modifica al comportamiento del sistema, entre otros:

- La FO debe presentar un mínimo de atenuación a esa longitud de onda, frente al caso anterior ya no se puede utilizar fibra óptica de plástico convencional,
- El fotodiodo tiene una sensibilidad que depende de la longitud de onda, al modificar la misma posiblemente cambie su sensibilidad y por tanto la corriente fotogenerada y por ello hay que modificar la etapa acondicionadora, en concreto los valores de  $R_f$  y  $V_{ref}$  ó  $R_G$  y  $V_{ref}$ .

## Problema 2

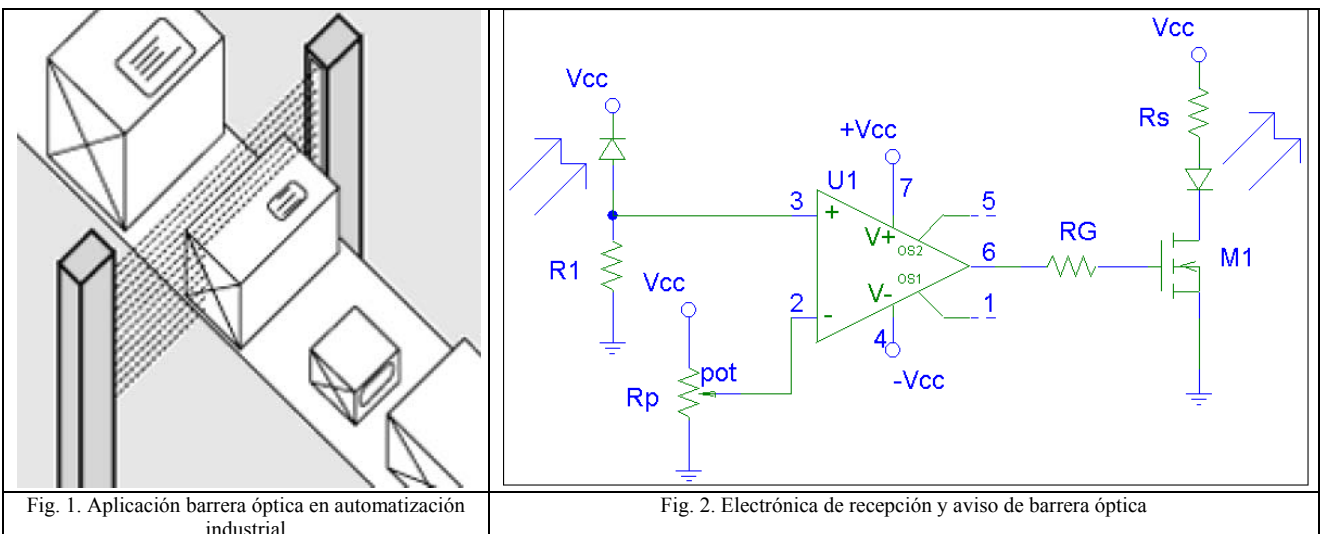
En la figura 1.1 se muestra una barrera óptica que controla las operaciones de ensamblaje manual de tipo secuencial, permitiendo prever y reducir los errores de montaje y sus costes. Estas barreras están formadas típicamente por emisores que generan un haz de luz que es interceptado por el objeto, y en la parte de recepción hay fotodiodos sensibles a la luz y una electrónica de control. Algunos de estos sistemas permiten la clasificación de 16000 paquetes a la hora.

Suponga que para cada emisor de la barrera hay un circuito receptor como el que se muestra en la figura 1.2, de forma que el LED del receptor se enciende cuando al fotodiodo le llega una cierta cantidad de luz al no existir objeto. Identificando qué LED se enciende se puede saber la altura del objeto.

Si  $R_1=1k$  se pide respuesta a las siguientes cuestiones:

- Describa el *funcionamiento completo del circuito* de la figura 1.2, identificando sus bloques e indique la función de cada uno de ellos y si operan en régimen lineal.
- Teniendo en cuenta que en la emisión se utiliza una fuente de luz infrarroja a 850nm, indique *cuál es el detector más adecuado* de los que se describen en la tabla 1, y por qué.
- Determine cuál ha de ser la *posición del potenciómetro* para que el LED inicialmente apagado, sólo se encienda cuando no hay un objeto que intercepte el haz. Suponiendo que la fuente de luz infrarroja emite  $100\mu W$ , y que al fotodiodo llega al menos el 75% de esa potencia en caso de que no haya objeto. Además, elija el *valor del potenciómetro* justificándolo. (Nota: recuerde que M1 es un MOSFET de enriquecimiento que conduce cuando la tensión puerta-fuente supera la tensión umbral,  $V_t$ ).
- Si la corriente generada por el fotodiodo asociada a la luz de la barrera fuera del orden de  $50\mu A$  y se desea amplificar esta señal de forma que la tensión en el terminal 3 de entrada del amplificador operacional U1, sea 1V, *proponga una solución utilizando otro A.O y represente el circuito total resultante, identifique sus bloques y describa su comportamiento completo.*

**Datos:**  $V_{cc}=5V$ ; M1:  $V_t=1V$ ; A.O. ideal.





Tipo detector	Fotodiodo G8423 (InGaAs)	Fotodiodo BPW34 (Si)
Responsividad (A/W) a longitud onda máxima sensibilidad	1,3 A/W @2300nm	0,56 A/W @ 900nm
Rango espectral	1200-2600 nm	400-1100 nm
Sensibilidad espectral relativa	Curva plana de 2 a 2.4 $\mu\text{m}$	Cae un 10% de 850 a 1000nm
Corriente de oscuridad	5 $\mu\text{A}$	2nA
Tiempo de respuesta	7 ns	100ns

Tabla 1. Especificaciones de los fotodetectores

## Solución

a)

Describe el *funcionamiento completo del circuito* de la figura 2, identificando sus bloques e indique la función de cada uno de ellos y si operan en régimen lineal.

El circuito receptor tiene un:

1) *primer bloque* formado por el fotodiodo polarizado en inversa y por tanto, comportándose como una fuente dependiente de la radiación incidente y la resistencia R1, cuya función es convertir la corriente fotogenerada por el fotodiodo en tensión. Este bloque se corresponde con el circuito acondicionador del transductor pasivo. Tiene un comportamiento lineal

2) el *segundo bloque* está formado por el A.O que al estar en lazo abierto, proporciona a la salida dos niveles de tensión:

+Vcc si  $V+ > V-$

-Vcc si  $V+ < V-$

Es decir se comporta como un circuito comparador, es un circuito no lineal

3) el *tercer bloque* contiene el transistor como elemento de paso que permite que se encienda o no el LED, como elemento de aviso o codificador de la información de interés (altura del paquete). Si la tensión de salida de la etapa anterior es -Vcc el transistor está al corte y el LED no luce, cuando no llega luz al fotodiodo y  $V+ < V-$ . Por el contrario, cuando llega luz suficiente al fotodiodo  $V+ > V-$  y por tanto a la salida del AO se obtiene +Vcc y el transistor conduce e igualmente el LED. Se trata de nuevo de un comportamiento no lineal del MOS que pasa de corte a conducción.

b)

Teniendo en cuenta que en la emisión se utiliza una fuente de luz infrarroja a 850nm, indique *cuál es el detector más adecuado* de los que se describen en la tabla 1, y por qué.

El primer elemento fundamental es que sea capaz de detectar la radiación de interés, es decir a 850nm, es por ello que sólo se puede utilizar el fotodiodo de Si presente en la tabla, es decir, el BPW34.

c)

Determine cuál ha de ser la *posición del potenciómetro* para que el LED inicialmente apagado, sólo se encienda cuando no hay un objeto que intercepte el haz. Suponiendo que la fuente de luz infrarroja emite 100 $\mu\text{W}$ , y que al fotodiodo llega al menos el 75% de esa potencia en caso de que no haya objeto. Además, elija el *valor del potenciómetro* justificándolo. (Nota: recuerde que M1 es un MOSFET de enriquecimiento que conduce cuando la tensión puerta-fuente supera la tensión umbral,  $V_t$ ).

Para calcular la posición del potenciómetro, se debe conocer cuál es el nivel de tensión en el terminal no inversor del amplificador operacional cuando incide la radiación del emisor porque no hay objeto.

Esta potencia óptica, supuesto el 75% de 100 $\mu\text{W}$ , es decir, 75 $\mu\text{W}$  genera una corriente fotogenerada:

$I_{\text{foto}} = S \cdot P_{\text{ópt}}$ ; la Sensibilidad a 850nm=10% S a 900nm según la tabla 1,

Por tanto,  $S(850\text{nm}) = 0,56 \text{ A/W} \cdot 0,9 = 0,504 \text{ A/W}$ ;



$I_{\text{foto}}=0,504 \text{ A/W} \cdot 0,075 \text{ mW}=37,8 \mu\text{A}$  (si se desprecia la corriente de oscuridad del fotodiodo)

$$V_{+}=I_{\text{foto}} \cdot R_1=37,8 \mu\text{A} \cdot 1\text{k}=37,8 \text{ mV}$$

El nivel de comparación fijado por el potenciómetro viene dado por un divisor resistivo, en cuyo equivalente Thévenin,  $R_{\text{TH}}$  no afecta para calcular  $V_{-}$  dado que el A.O es ideal y por tanto  $i_{-}=0$  y por tanto:

$$V_{-}=\alpha V_{\text{cc}}$$

$$V_{+}=V_{-}=37,8 \text{ mV}, \text{ luego } \alpha=378 \text{ mV}/5\text{V}=7,56 \cdot 10^{-3}, \text{ luego } 0,75\%$$

Por otro lado, el valor de potenciómetro es arbitrario siempre que sea un valor razonable, por ejemplo 1k

#### d)

Si la corriente generada por el fotodiodo asociada a la luz de la barrera fuera del orden de  $50 \mu\text{A}$  y se desea amplificar esta señal de forma que la tensión en el terminal de entrada no inversor del amplificador operacional  $U_1$ , sea 1V, *proponga una solución utilizando otro A.O y represente el circuito total resultante, identifique sus bloques y describa su comportamiento completo.*

Se utilizaría un amplificador operacional realimentado negativamente, es decir, con un comportamiento lineal como amplificador de tensión. Por ejemplo una configuración no inversora. La cual tiene una ganancia de  $(1+R_f/R_2)$ .

La ganancia que necesitamos es de  $1\text{V}/(50 \mu\text{A} \cdot 1\text{k})=20$

Por tanto la relación de resistencias  $R_f/R_2=19$ , hay múltiples soluciones por ejemplo  $R_f=19\text{k}$  y  $R_2=1\text{k}$ . Además al modificar la tensión generado por la potencia óptica umbral se debe modificar el umbral de comparación del divisor resistivo de forma que el nuevo valor es:

$$V_{-}=\alpha V_{\text{cc}}$$

$$V_{+}=V_{-}=1\text{V}, \text{ luego } \alpha=1\text{V}/5\text{V}=0,25, \text{ luego } 25\%$$

Con respecto a los bloques que forman el nuevo circuito tenemos:

1) un *primer bloque* formado por el fotodiodo polarizado en inversa y por tanto, comportándose como una fuente dependiente de la radiación incidente y la resistencia  $R_1$ , cuya función es convertir la corriente fotogenerada por el fotodiodo en tensión. Este bloque se corresponde con el circuito acondicionador del transductor pasivo.

2) el *segundo bloque* está formado por el amplificador no inversor de ganancia 20, formado por el A.O realimentado negativamente en una configuración no inversora. Su función es amplificar la tensión proporcional a la radiación incidente hasta alcanzar una amplitud de 1V.

3) el tercer bloque es nuevamente el circuito comparador, formado por el A.O. en lazo abierto, proporcionando a la salida dos niveles de tensión:

$$+V_{\text{cc}} \text{ si } V_{+}>V_{-}$$

$$-V_{\text{cc}} \text{ si } V_{+}<V_{-}$$

El nivel de comparación lo fija el divisor resistivo que ahora se modifica al nuevo nivel.

3) el *cuarto bloque* contiene el transistor como elemento de paso que permite que se encienda o no el LED, como elemento de aviso o codificador de la información de interés (altura del paquete). Si la tensión de salida de la etapa anterior es  $-V_{\text{cc}}$  el transistor está al corte y el LED no luce, cuando no llega luz al fotodiodo y  $V_{+}<V_{-}$ . Por el contrario, cuando llega luz suficiente al fotodiodo  $V_{+}>V_{-}$  y por tanto a la salida del AO se obtiene  $+V_{\text{cc}}$  y el transistor conduce e igualmente el LED. Se trata de nuevo de un comportamiento no lineal del MOS que pasa de corte a conducción.

Como se observa el comportamiento es equivalente al caso anterior, sólo se modifica el nivel comparación y por tanto la posición del potenciómetro a un valor más lejano de cero para evitar posibles errores asociados al ruido.