

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

## **INSTRUCCIONES PARA EL EXAMEN** (No se puntuarán las respuestas entregadas que no se ajusten a lo indicado en estas instrucciones)

- La duración total del examen **es de 3 horas**
- El examen consta de las instrucciones para la realización del mismo y **un caso de estudio dividido en 5 partes**, distribuidos en 4 hojas (8 páginas)
- La puntuación y tiempo estimado de realización se encuentran indicados en el título de cada parte del examen
- **Es obligatorio poner el nombre, apellidos y grupo** en el que el estudiante se encuentra matriculado **en esta primera hoja del enunciado del examen (INSTRUCCIONES), al comienzo del mismo.**
- Junto con el enunciado, **cada estudiante tendrá hojas en blanco** para contestar a **todas las partes del examen**, y para realizar operaciones en **sucio**. Todas estas hojas **tienen que tener incluidos el nombre, apellidos y grupo del estudiante, al comienzo del examen**
- **Todas las partes del examen se contestarán en hojas en blanco.** En la **parte 3** debe incluirse también obligatoriamente **el Diagrama de Bode** disponible al final del enunciado, con el nombre apellidos y grupo del estudiante, aunque esté en blanco.
- **Cada parte se contestará en hojas separadas**
- Al final del examen, el estudiante **DEBE ENTREGAR EL ENUNCIADO DEL EXAMEN y AL MENOS 1 HOJA POR CADA PARTE, CON EL TÍTULO DE LA PARTE Y SU RESPUESTA** (aunque esta respuesta quede en blanco)
- **EN TODAS LAS PREGUNTAS DEL EXAMEN ES OBLIGATORIA LA DEDUCCIÓN DE LAS RESPUESTAS** (NO ES VÁLIDA LA APLICACIÓN DIRECTA DE FÓRMULAS SIN DEDUCIR, SALVO LAS QUE SE INDIQUE EXPRESAMENTE EN EL ENUNCIADO) **Y LA JUSTIFICACIÓN DE TODAS LAS APROXIMACIONES QUE SE REALICEN** EN LOS CÁLCULOS QUE SE PIDEN.
- Se debe **contestar a cada pregunta de forma clara, limpia y ordenada**, evitando enmiendas y tachaduras en las respuestas que se entreguen.

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

Se quiere diseñar un **sistema detector de objetos** con un LED de infrarrojo y un fotodiodo, basado en **reflexión**. Cuando se detecta un objeto en la zona analizada la señal del LED se refleja e incide sobre el fotodiodo. Cuando no hay un objeto, no hay reflexión y la señal recibida en el fotodiodo puede considerarse nula.

El sistema está compuesto de tres bloques: emisor, detector y sistema de alimentación.

El **emisor** consta de un oscilador sinusoidal que genera una señal de 50kHz y 6Vp y un amplificador de transadmitancia como driver del LED.

El **detector** incluye un amplificador para convertir la corriente de salida del fotodiodo. La señal de salida de este amplificador se filtra para eliminar las componentes de señal adicionales que puedan haber llegado al fotodiodo. Finalmente, la señal detectada y filtrada llega a un circuito de decisión cuya salida indica la presencia (salida 5V) o ausencia (salida 0V) de un objeto.

**Para alimentar el circuito** se dispone de una fuente de alimentación simétrica de  $\pm 12V$  y un regulador de tensión lineal que permite obtener los 5V para la alimentación del comparador de salida, a partir de la fuente de tensión de  $+12V$ .

El esquema del circuito completo es el que se muestra en la siguiente figura:

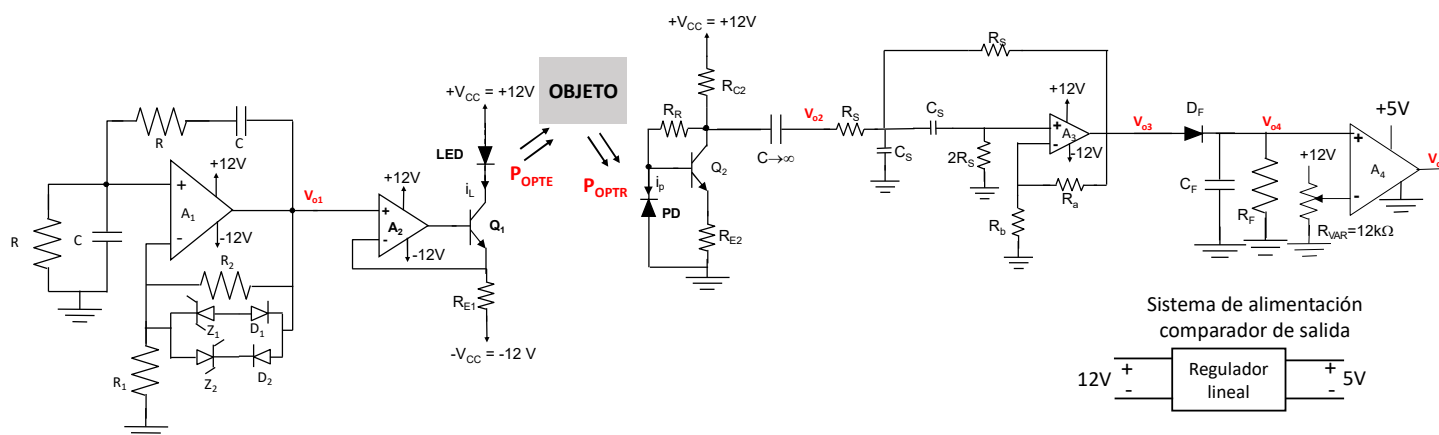


Figura 0. Esquema completo del sistema electrónico para detectar la presencia de un objeto con funcionamiento por reflexión.

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

### PARTE 1 (25 minutos, 1.5 puntos)

Análisis del oscilador en puente de Wien (ETAPA 1) que genera la tensión  $V_{o1}$  de la figura 0.

DATOS: Esquema detallado del oscilador en puente de Wien (ETAPA 1) del sistema de la figura 0:

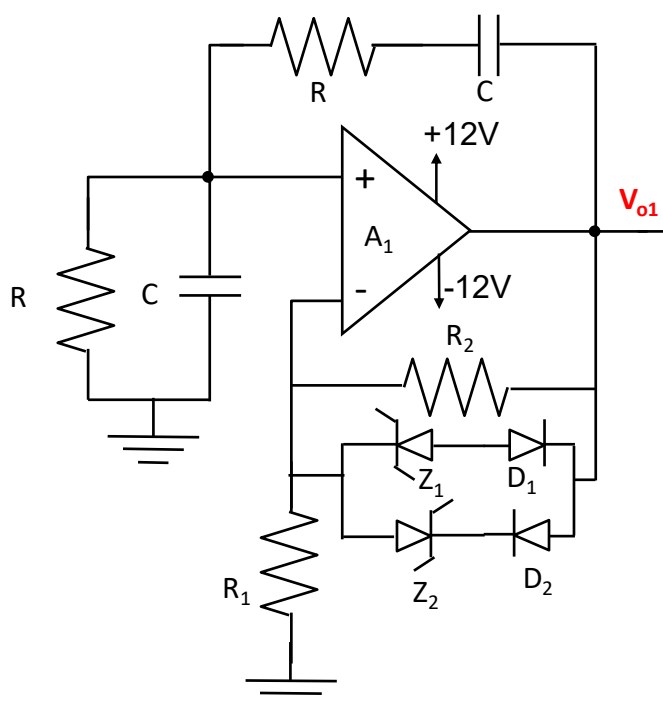
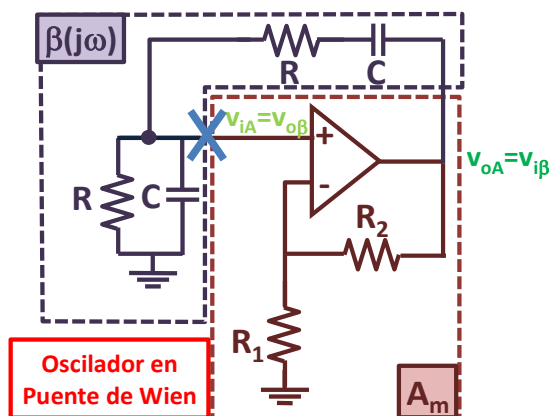


Figura 1. Esquema detallado del oscilador en puente de Wien

Se pide que conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

1. Dibuje el circuito equivalente del oscilador en lazo abierto, obtenga la ganancia de lazo  $T(j\omega)$  y deduzca la frecuencia de oscilación y la condición de arranque del oscilador.



$$A_m \cdot \beta(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{Z_p}{Z_s + Z_p} = \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot j\omega RC}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + 3j\omega RC}$$

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

Frecuencia de oscilación:

$$\angle A_m \cdot \beta(j\omega_{osc}) = 0^\circ + 2k\pi \Rightarrow \text{Im}(A_m \cdot \beta(j\omega_{osc})) \Rightarrow 1 - \omega_{osc}^2 R^2 C^2 = 0 \Rightarrow \omega_{osc} = \frac{1}{RC}$$

Condición de arranque:

$$|A_m \cdot \beta(j\omega_{osc})| > 1 \Rightarrow \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot 1}{3} > 1 \Rightarrow \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) > 3$$

**2. Calcule los valores de todos los componentes del oscilador para tener en Vo1 la señal requerida de 50kHz y 6Vp. Estime el valor de la tensión Zener de Z1 y Z2 (no es necesario realizar un cálculo exacto, basta con indicar un valor aproximado, debidamente razonado).**

Para frecuencia de oscilación de 50kHz: Por ejemplo:  $R = 10\text{k}\Omega$  y  $C = 320\text{pF}$

Para la condición de arranque: Por ejemplo:  $R_1 = 1\text{k}\Omega$  y  $R_2 = 2.2\text{k}\Omega$

Para el mantenimiento de la señal de salida a 6Vp y la tensión en la entrada inversora del operacional  $6\text{Vp}/3 = 2\text{Vp}$ , de forma aproximada por tanto:  $V_{Z1} = V_{Z2} = 3.3\text{V}$  (considerando la tensión umbral de los diodos  $D_1$  y  $D_2$  0,7V)

**3. Calcule el producto ganancia x ancho de banda y slew rate mínimos del amplificador  $A_1$ , necesarios para el correcto funcionamiento del circuito.**

Producto ganancia por ancho de banda mínimo del AO:  $G=3$ , BW necesario  $= 10 \cdot 50\text{kHz} \Rightarrow G \cdot \text{BW}_{\min} = 1,5\text{MHz}$

Slew rate mínimo necesario:  $\frac{dvo}{dt}_{\max} = 6V \cdot 2\pi \cdot 50\text{kHz} = 1,9 \cdot 10^6 V/s \Rightarrow \text{SR}_{\min} = 1,9\text{V}/\mu\text{s}$

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

## PARTE 2 (15 minutos, 1 punto)

### Análisis del amplificador de transadmitancia (ETAPA 2) como driver del LED de infrarrojo

**DATOS:** Esquema detallado del amplificador de transadmitancia (ETAPA 2) del sistema de la figura 0:

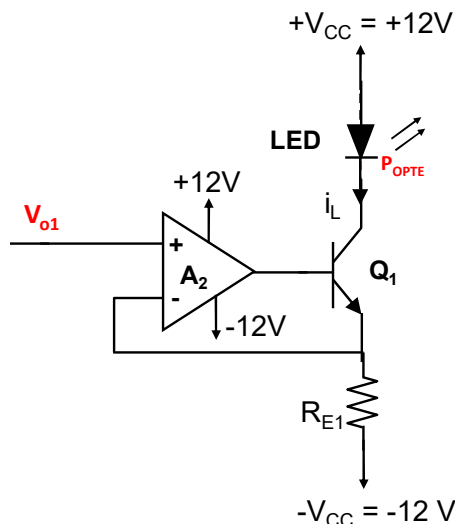
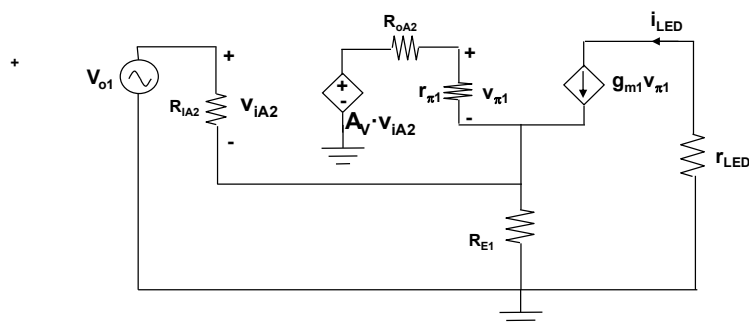


Figura 2. Esquema detallado del amplificador de transadmitancia (driver del LED)

Se pide que conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

4. Represente el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias del amplificador formado por  $A_2$  y  $Q_1$ . Identifique la topología de realimentación de este circuito y calcule la ganancia de la red de realimentación.



(Con  $i_L = i_{LED}$ )

Topología serie-serie (Transadmitancia,  
 $G_V = i_{LED}/v_{o1}$ )

La red de realimentación es la resistencia  $R_{E1}$ ,  
y su ganancia es:  $\beta_Z = R_{E1}$

5. Si la ganancia de la red A idealizada ( $A'$ ) del amplificador anterior (apartado 4) se asume que  $\rightarrow \infty$  y  $R_{E1} = 500\Omega$ , calcule el valor pico-pico de la componente alterna de la corriente en el LED  $i_{LEDp}$

Si  $A' \rightarrow \infty$  ( $A' \cdot \beta \gg 1$ ) y la ganancia del amplificador realimentado queda:

$$A_{YCR} = \frac{i_{LED}}{v_{o1}} \cong \frac{1}{\beta_Z} = \frac{1}{R_{E1}} = 2 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{A}{V} \right]$$

Por lo tanto, si  $v_{o1p} = 6V_p \Rightarrow i_{LEDp} = 12mA_p$  (24mApp)

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

### PARTE 3 (60 minutos, 4 puntos)

**Análisis del amplificador de transimpedancia (ETAPA 3) utilizado como circuito de acondicionamiento del fotodiodo**

**DATOS:** Esquema detallado del amplificador de transimpedancia (ETAPA 3) del sistema de la figura 0:

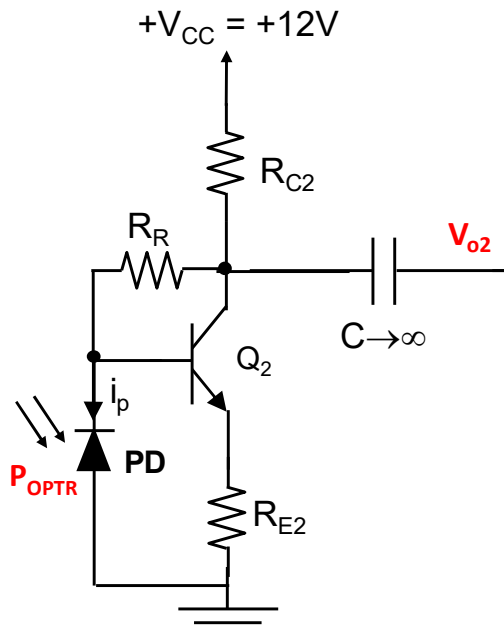
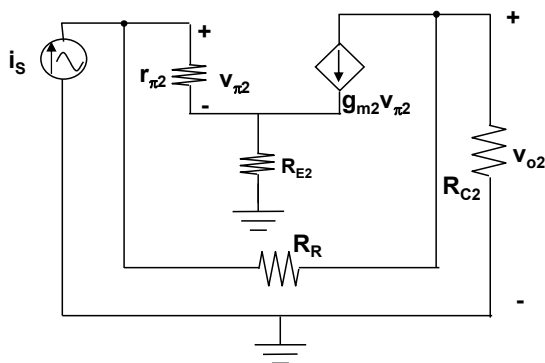


Figura 3. Esquema detallado del amplificador de transimpedancia (circuito de acondicionamiento del fotodiodo)

Se pide que conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

6. Represente el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias del amplificador formado por  $Q_2$ . Identifique la topología de realimentación de este amplificador y calcule la ganancia  $v_{o2}/i_p$  a frecuencias medias. Considere:  $R_{C2} = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_{E2} = 200\Omega$ ,  $R_F = 100\text{ k}\Omega$ ,  $g_{m2} = 270\text{mA/V}$  y  $r_{\pi2} = 1.15\text{k}\Omega$ , impedancia vista desde  $V_{o2}$  hacia la derecha  $\rightarrow \infty$ .

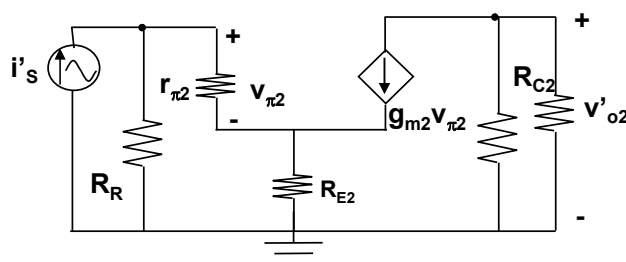
Analizando el circuito con  $i_s = -i_p$



Con  $i_s = -i_p$

Topología paralelo-paralelo (transimpedancia)

Red A':



$$v'_{o2} = -g_{m2} \cdot v_{\pi2} \cdot (R_{C2} \parallel R_F)$$

$$\frac{v_{\pi2}}{r_{\pi2}} = i'_s \cdot \frac{R_F}{R_F + r_{\pi2} + R_{E2}(\beta_2 + 1)}$$

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

$$A'_Z = \frac{v'_{o2}}{i'_s} = -\frac{\beta_2 \cdot (R_{C2} \parallel R_R) R_R}{R_R + r_{\pi 2} + R_{E2}(\beta_2 + 1)}$$

$$A'_Z \cong -\frac{\beta_2 \cdot (R_{C2}) R_R}{R_R + r_{\pi 2} + R_{E2}(\beta_2 + 1)} = -190k\Omega$$

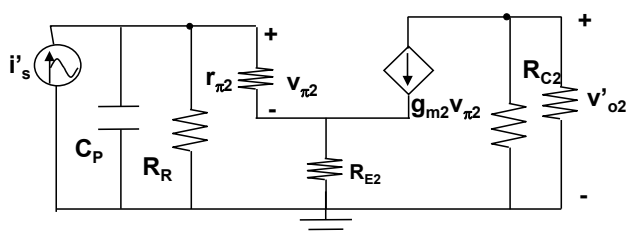
$$\beta: \beta_Y = \frac{1}{R_R} = -10^{-5} \left[ \frac{A}{V} \right]$$

$$\text{Ganancia: } A_{ZCR} = \frac{v_{o2}}{i_s} = \frac{A'_Z}{1 + A'_Z \cdot \beta_Y} = \frac{-190k}{2.9} = -65.5k\Omega$$

Con

$$\frac{v_{o2}}{i_p} = +65.5k\Omega$$

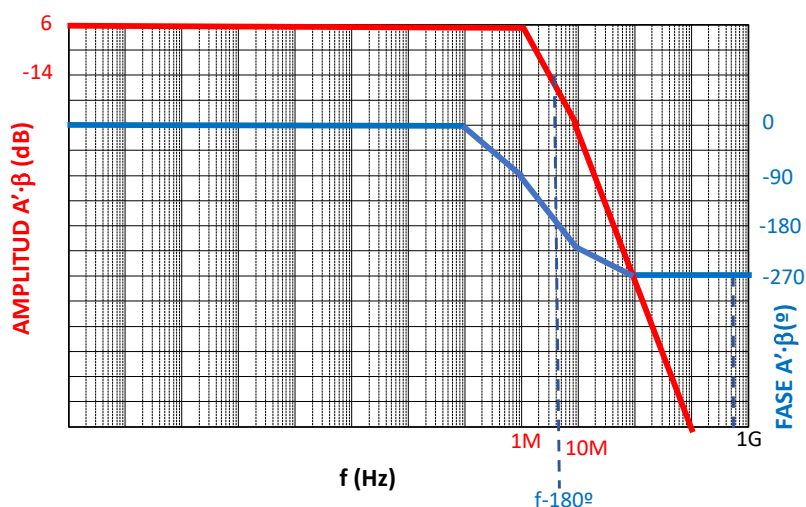
7. Si el amplificador anterior (apartado 6) tiene dos polos en 1MHz y 10MHz y la capacidad equivalente del fotodiodo es  $C_P=4pF$ . Determine si el amplificador realimentado es estable (asuma que  $|v_{o2}/i_p|$  a frecuencias medias es  $67 \cdot 10^3$ , en las unidades adecuadas a la topología de realimentación)



El condensador  $C_P$  introduce un nuevo polo en el amplificador,

$$f_{CP} = \frac{1}{2\pi \cdot C_P \cdot (R_R \parallel (r_{\pi 2} + R_{E2}(\beta_2 + 1)))} \cong 1MHz$$

Representando el Diagrama Asintótico de Bode de  $A' \cdot \beta$ :



$|A' \cdot \beta|_{f=180^\circ} \cong -14dB < 0dB \Rightarrow$  El amplificador realimentado es estable.

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

#### PARTE 4 (25 minutos, 1.5 puntos)

**Análisis de la ETAPA 4 (filtro +detector de pico+ comparador)**

**Asuma en los siguientes apartados que el amplificador del apartado 7 resulta estable.**

**DATOS:** Esquema detallado del filtro +detector de pico+ comparador (ETAPA 4) del sistema de la figura 0:

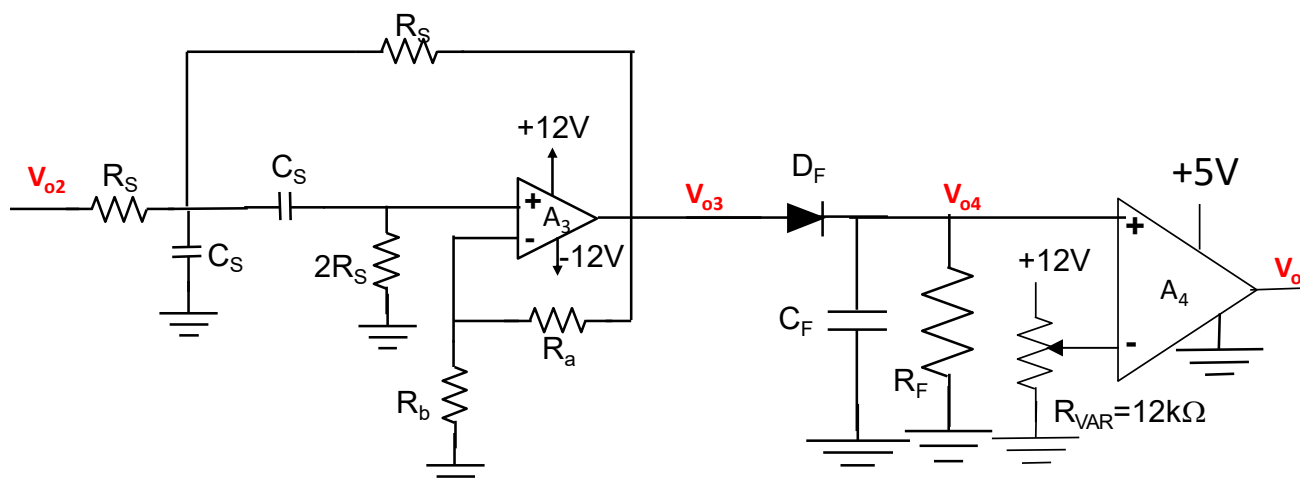


Figura 4. Esquema detallado del filtro +detector de pico+ comparador (circuito de decisión de la presencia de objeto)

Se pide que conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

Dada la función de transferencia  $V_{o3}/V_{o2}$  con los valores de los componentes dados:

$$T(s) = \frac{V_{o3}}{V_{o2}}(s) = \frac{\frac{k}{R_S \cdot C_S} \cdot s}{s^2 + s \left( \frac{3-k}{R_S \cdot C_S} \right) + \frac{1}{R_S^2 \cdot C_S^2}}$$

$$k = 1 + \frac{R_a}{R_b}$$

$R_S = 10\text{k}\Omega$   
 $C_S = 320\text{pF}$   
 $R_a = 1.5\text{k}\Omega$   
 $R_b = 1\text{k}\Omega$

**8. Indicar el tipo de filtro que implementa el circuito y calcular frecuencia característica del filtro y su ancho de banda.**

Se trata de un filtro paso banda de segundo orden. Identificando valores con la función de transferencia

genérica de este tipo de filtros:  $T(s) = \frac{a_1 \cdot s}{s^2 + s \frac{\omega_n}{Q} + \omega_n^2}$



NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

La frecuencia característica queda:  $f_n = \frac{1}{R_s \cdot C_s} \cong 50kHz$  El factor de calidad:  $Q = \frac{1}{3-k} = \frac{1}{3-2.5} = 2$

El ancho de banda en este tipo de filtros es:  $BW = \frac{f_n}{Q} \cong 25kHz$

La ganancia en la frecuencia central del filtro:  $A_{vfn} = k \cdot Q = 5 \left[ \frac{V}{V} \right]$

**9. Suponiendo que  $D_F$ ,  $C_F$  y  $R_F$  forman un circuito detector de pico ideal, es decir, que en  $V_{o4}$  se tiene una señal continua de valor igual al valor de pico de  $V_{o3}$ ; diseñar cómo hay que ajustar el potenciómetro  $R_{VAR}$  para que la salida  $V_o$  detecte la presencia de un objeto si la amplitud de la corriente  $i_p$  es mayor o igual a  $5\mu A_p$ .**

Si la corriente del fotodiodo son  $5\mu A_p$ :

$$V_{o4} = V_{o3P} = \frac{V_{o3P}}{V_{o2P}} \cdot \frac{V_{o2P}}{i_{pdp}} \cdot i_{pdp} = 5 \left[ \frac{V}{V} \right] \cdot 65.5k\Omega \cdot 5\mu A = 1.64V$$

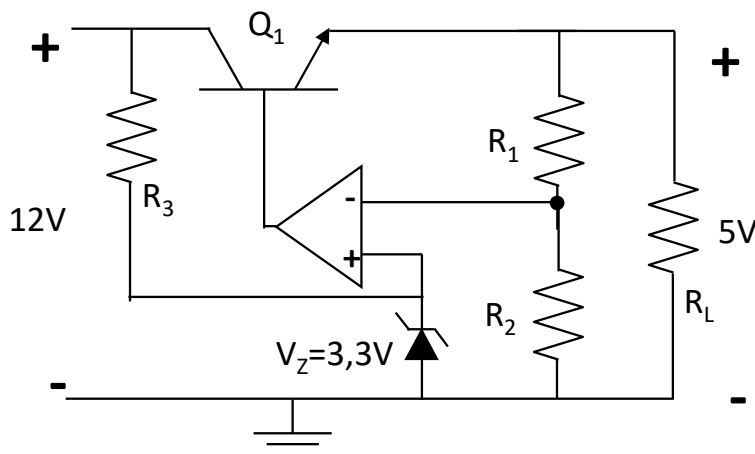
Por lo tanto, la tensión en la entrada inversora del amplificador  $A_4$  debe ser 1.64V. Como  $R_{VAR}$  es de 12k y está entre 12V y masa, la corriente que circula es 1mA. Por lo tanto,  $R_{VAR}$  debe ajustarse con 1.64k $\Omega$  entre la entrada inversora de  $A_4$  y masa y 10.36k $\Omega$  entre +12V y la entrada inversora de  $A_4$ .

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

### PARTE 5 (30 minutos, 2 puntos)

**Análisis del sistema de alimentación (regulador de tensión lineal).**

**DATOS:** Esquema de partida del regulador lineal



- Corriente mínima Zener,  $i_{z\min} = 5\text{mA}$
- Potencia máxima en Zener,  $P_{z\max} = 0.4\text{W}$
- Potencia máxima en transistor  $Q_1$ ,  $P_{\text{MAX}Q_1} = 3.5\text{W}$

Se pide que conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

**10. Calcular las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , para que la tensión a la salida del regulador sean los 5V requeridos.**

Teniendo en cuenta que en el AO  $V_+ = V_-$ , se tiene:

$$V_Z = 3.3\text{V} = 5\text{V} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow 0.66R_1 = 0.34R_2 \Rightarrow R_2 = 1.94R_1$$

Por ejemplo:  $R_1 = 10\text{k}\Omega$  y  $R_2 = 19.4\text{k}\Omega$

**11. Calcular  $R_3$  para el correcto funcionamiento del Zener**

Para el correcto funcionamiento del Zener:  $i_{z\min} < i_z < \frac{P_{z\max}}{V_Z}$

$$\text{La corriente por el Zener es: } i_z = \frac{12\text{V} - V_Z}{R_3} = \frac{8.7\text{V}}{R_3}$$

$$\text{Por tanto: } i_z > i_{z\min} \Rightarrow \frac{8.7\text{V}}{R_3} > 5\text{mA} \Rightarrow R_3 < 1.74\text{k}\Omega \quad i_z < 120\text{mA} \Rightarrow \frac{8.7\text{V}}{R_3} < 120\text{mA} \Rightarrow R_3 > 72.5\Omega$$

Por ejemplo:  $R_3 = 500\Omega$

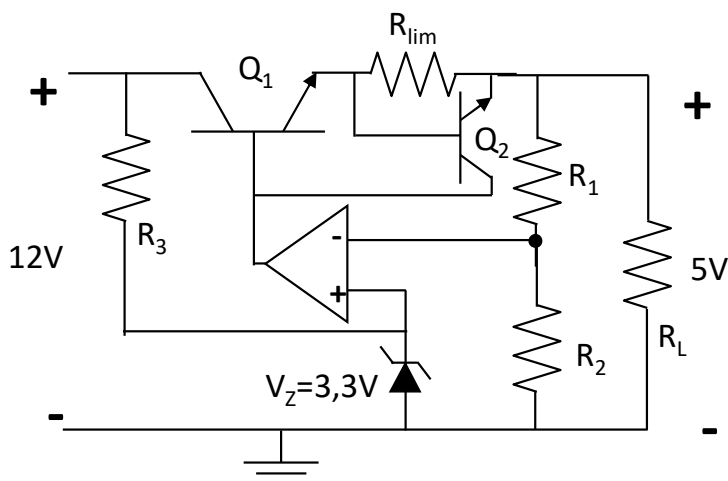
**12. Calcular la máxima corriente que puede entregarse a la carga  $R_L$ , sin que el transistor  $Q_1$  sobrepase sus límites de funcionamiento**

Para que en el transistor  $Q_1$  no se sobrepase la máxima potencia que puede disipar (3.5W) se tiene:

$$P_{\text{MAX}Q_1} = 3.5\text{W} = V_{CEQ_1} \cdot I_{CQ_1\text{MAX}} \Rightarrow I_{CQ_1\text{MAX}} = \frac{3.5\text{W}}{12\text{V} - 5\text{V}} = 0.5\text{A}$$

NOMBRE Y APELLIDOS:	SOLUCIÓN	GRUPO
---------------------	----------	-------

13. Dibujar el regulador incluyendo el esquema de un limitador de corriente que permita limitar la corriente al valor máximo obtenido en el apartado anterior. Calcule el valor de la/s resistencia/s del limitador de corriente.



$$R_{lim} = \frac{V_{BEQ2ON}}{0.5A} = \frac{0.6V}{0.5A} = 1.2\Omega$$

14. Determinar el valor máximo que puede tener la resistencia de carga  $R_L$  para que el regulador, con el limitador de corriente incorporado, funcione como fuente de tensión

Para que el limitador funcione como fuente de tensión, la máxima corriente que puede demandar la carga es

$$0.5A, \text{ por tanto: } R_{LMIN} = \frac{5V}{0.5A} = 10\Omega$$

15. Calcular el rendimiento del regulador de tensión lineal.

$$\text{El rendimiento del regulador lineal será: } \eta = \frac{5V \cdot I_o}{12V \cdot I_i} \cong \frac{5V \cdot I_{CQ1}}{12 \cdot I_{EQ1}} \cong \frac{5V}{12V} \cong 0.42 \text{ (42\%)}$$