

# **EBAS**

## **Exámenes resueltos**

### **2000-2009**

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS DE TEORÍA**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios, ni el de colecciones o libros (exclusivos) de problemas, apuntes de clase, fotocopias de transparencias, anotaciones en hojas sueltas, etc.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 10/2/00**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 15/2/00, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** Suponiendo que los diodos de la Figura 1 son iguales e ideales salvo por tener una tensión umbral igual a 0,6 V, indique su estado (ON/OFF) y el valor de la tensión  $V_O$  para los valores de  $V_1$  señalados en la tabla. Desarrolle y explique cada caso y escriba los resultados finales en la tabla.

$V_1$ (V)	$D_1$	$D_2$	$V_O$ (V)	
0	ON	ON	5,4	(0,9 p.)
5	ON	OFF	7,8	(0,9 p.)
9,4	OFF	OFF	10	(0,7 p.)

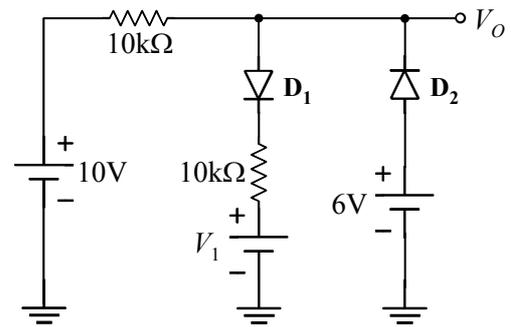


Figura 1

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1**

En todos los casos el diodo  $D_2$  limita  $V_O \geq 5,4$  V

$V_1=0$  V Suponemos  $D_1$  ON y  $D_2$  OFF, por tanto:  $10 = (10+10)I+0,6$ ;  $I = 0,47$  mA  
 Esa corriente produce una  $V_O = 4,7+0,6 = 5,3$  V que es imposible. Por tanto,  $D_2$  conduce y  $V_O=5,4$  V

$V_1=5$  V Suponemos  $D_1$  ON y  $D_2$  OFF, por tanto:  $10 = (10+10)I+0,6+5$ ;  $I = 0,22$  mA  
 Esa corriente produce una  $V_O = 5+2,2+0,6 = 7,8$  V que es coherente con las hipótesis.

$V_1=9,4$  V Suponemos  $D_1$  ON y  $D_2$  OFF, por tanto:  $10 = (10+10)I+0,6+9,4$ ;  $I = 0$  mA, lo que supone  $D_1$  OFF. Al no pasar corriente,  $V_O = 10$  V, lo que es coherente con la hipótesis  $D_2$  OFF.

**Ejercicio 2.** Para el circuito de la Figura 2.1, se pide:

- Expresar el valor de  $r_\pi/R$  (1,0 p.)
- Expresar la relación  $|Z| = |V_g/I_d|$  de pequeña señal en función de la frecuencia, siendo  $V_g$  e  $I_d$  las amplitudes complejas (fasores) de  $v_g$  e  $i_d$  y sabiendo que  $V_{CC} - V_{BE} \gg kT/e$  (1,0 p.)
- Expresar y dibujar aproximadamente en la gráfica de la Figura 2.2 la función  $|Z|/R$  en la región en que se cumple  $\omega_0 \ll \omega \ll \beta\omega_0$ , donde  $\omega_0 = 1/r_\pi C$  (0,5 p.)

**DATOS:**  $r_\pi = h_{ie} = \frac{kT/e}{I_B}$ ;  $\beta = h_{fe} \gg 1$ ;  $r_o = h_{oe}^{-1} = \infty$ ; los efectos capacitivos en el transistor son despreciables

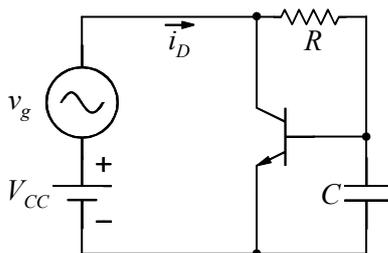


Figura 2.1

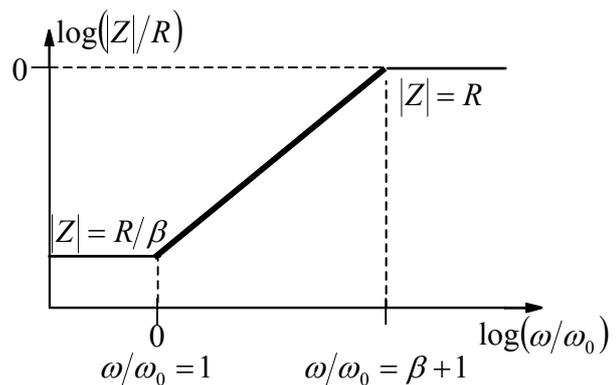
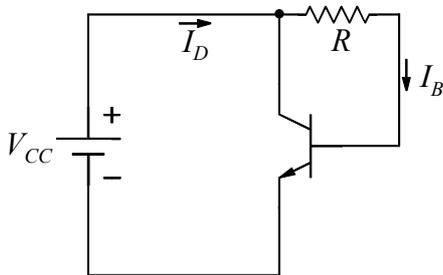


Figura 2.2

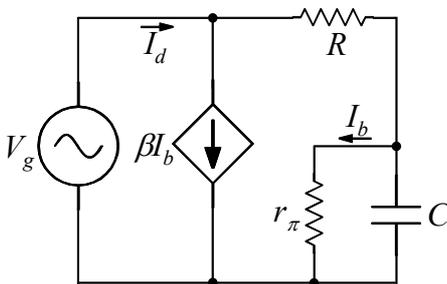
<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2**



a) En continua:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \Rightarrow \frac{r_\pi}{R} = \frac{kT/e}{RI_B} = \frac{kT/e}{V_{CC} - V_{BE}}$$



b) En alterna:

$$Z = \frac{V_g}{I_d} = \frac{I_b r_\pi + R(I_b + I_b j\omega C r_\pi)}{\beta I_b + I_b + I_b j\omega C r_\pi} = \frac{r_\pi + R(1 + j\omega C r_\pi)}{\beta + 1 + j\omega C r_\pi} \cong$$

$$\cong \left( \begin{matrix} r_\pi \ll R \\ \beta \gg 1 \end{matrix} \right) \cong R \frac{1 + j\omega C r_\pi}{\beta + j\omega C r_\pi} = R \frac{1 + j\omega/\omega_0}{\beta + j\omega/\omega_0}$$

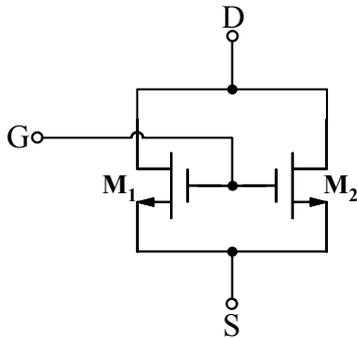
Y tomando el módulo  $|Z| = R \sqrt{\frac{1 + (\omega/\omega_0)^2}{\beta^2 + (\omega/\omega_0)^2}}$

c) En la región de interés  $\omega/\omega_0$  es despreciable frente a  $\beta$  y 1 frente a  $\omega/\omega_0$ :

$$|Z| \cong R \frac{\omega/\omega_0}{\beta} \Rightarrow \log(|Z|/R) \cong \log(\omega/\omega_0) - \log \beta$$

**Ejercicio 3.** Para una determinada aplicación en que se desea duplicar la capacidad de conducción de corriente del transistor MOS de canal n, se ha decidido conectar otro transistor similar en paralelo, como muestra la Figura 3. En el caso ideal en que ambos transistores fueran idénticos, el dispositivo conjunto que forman se comportaría como un único transistor equivalente de parámetro  $\kappa$  igual al doble del de los transistores individuales, y de la misma tensión umbral.

No obstante, se ha detectado que las tensiones umbrales de ambos transistores son diferentes, lo que le aparta del funcionamiento ideal indicado, como pretende ilustrar este ejercicio. A pesar de ello, el dispositivo conjunto se comporta como un MOSFET de canal n en cuanto a que tiene  $V_T$  y  $V_{DS,SAT}$



Obtener razonadamente para el dispositivo conjunto:

- a) Su tensión umbral  $V_T$  **(0,8 p.)**
- b) La tensión  $V_{DS,SAT}$  para  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  **(0,8 p.)**
- c) La expresión de la característica  $I_D = f(V_{GS})$  para saturación (activa), es decir,  $M_1$  y  $M_2$  en saturación **(0,9 p.)**

**DATOS:**  $\kappa_1 = \kappa_2 = 1 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_{T1} = 1 \text{ V}$ ,  $V_{T2} = 2 \text{ V}$ ,  
En saturación  $I_D = \kappa (V_{GS} - V_T)^2$

Figura 3

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3**

a) La tensión umbral  $V_T$  del dispositivo conjunto será aquella para la que si  $V_{GS} < V_T$ ,  $M_1$  y  $M_2$  están en corte. Por tanto, coincide con el menor valor de  $V_{T1}$  y  $V_{T2}$  :

$$V_T = V_{T1} = 1 \text{ V}$$

b) La tensión  $V_{DS,SAT}$  del dispositivo conjunto será aquella para la que si  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$ ,  $M_1$  y  $M_2$  están en activa. Por tanto, coincide con el mayor valor de  $V_{DS,SAT1}(V_{GS})$  y  $V_{DS,SAT2}(V_{GS})$ :

$$V_{T1} < V_{T2} \Rightarrow V_{DS,SAT1} = V_{GS} - V_{T1} > V_{GS} - V_{T2} = V_{DS,SAT2} \Rightarrow V_{DS,SAT} = V_{DS,SAT1} = 3 \text{ V} - 1 \text{ V} = 2 \text{ V}$$

c)

$$\left. \begin{array}{l} I_D = I_{D1} + I_{D2} \\ I_{D1} = \kappa_1 (V_{GS} - V_{T1})^2 \\ I_{D2} = \kappa_2 (V_{GS} - V_{T2})^2 \end{array} \right\} \Rightarrow I_D = \kappa_1 (V_{GS} - V_{T1})^2 + \kappa_2 (V_{GS} - V_{T2})^2 \Rightarrow I_D (\text{mA}) = 2V_{GS}^2 - 6V_{GS} + 5, \quad (V_{GS} \text{ en V})$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

SOLUCIÓN EJERCICIO 3 (Cont.)

**Ejercicio 4.** La señal alterna  $v_i$ , de pequeña amplitud, es amplificada por el circuito de la Figura 4. Los transistores están polarizados en modo activo directo con la misma corriente continua de colector, que no necesita calcular. Se pide:

- a) Dibujar el circuito equivalente para alterna y pequeña señal (1,0 p)
- b) Decir en qué configuración trabaja cada transistor (0,3 p)
- c) Calcular la ganancia de pequeña señal  $A_v = v_o/v_i$  (0,8 p)
- d) Calcular la impedancia de entrada al amplificador,  $R_i$  (0,4 p)

**DATOS**

Para ambos transistores:

$$r_\pi = h_{ie} = 1,25 \text{ k}\Omega; r_o = h_{oe}^{-1} = \infty; \beta = h_{fe} = 100.$$

A la frecuencia de la señal los condensadores pueden tratarse como cortocircuitos

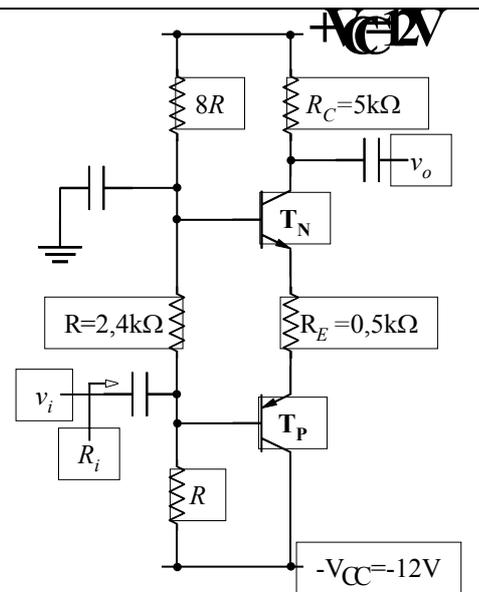
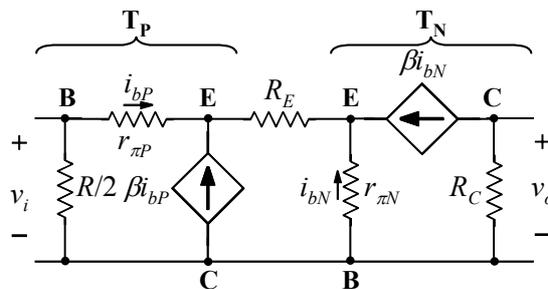


Figura 4

SOLUCIÓN EJERCICIO 4

a) El circuito equivalente es el siguiente, donde  $r_{\pi N} = r_{\pi P} \equiv r_\pi = kT/e \beta I_C = 1,25 \text{ k}\Omega$ .



b)  $T_P$  trabaja en colector común, y  $T_N$  en base común

---

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4 (Cont.)**

c) En los nodos de emisor:  $(\beta+1)i_{bN} = -(\beta+1)i_{bP} \Rightarrow i_{bN} = -i_{bP}$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta R_C i_{bN}}{i_{bP}(r_{\pi P} + (\beta+1)R_E) - r_{\pi N} i_{bN}} = \frac{\beta R_C}{(\beta+1)R_E + 2r_{\pi}} = \frac{500 \text{ k}\Omega}{52,5 \text{ k}\Omega} = 9,5$$

d)

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{v_i}{\frac{v_i}{R/2} + i_{bP}} = \frac{v_i}{\frac{v_i}{R/2} - i_{bN}} = \frac{v_i}{\frac{v_i}{R/2} + \frac{v_o}{\beta R_C}} = \frac{1}{\frac{1}{R/2} + \frac{A_v}{\beta R_C}} = \frac{1}{\frac{1}{R/2} + \frac{1}{(\beta+1)R_E + 2r_{\pi}}} = \\ &= \frac{R}{2} \parallel ((\beta+1)R_E + 2r_{\pi}) \cong \frac{R}{2} = 1,2 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS DE TEORÍA**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios, ni el de colecciones o libros (exclusivos) de problemas, apuntes de clase, fotocopias de transparencias, anotaciones en hojas sueltas, etc.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 10/07/00**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 13/07/00, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** En la figura 1.1 se presenta un circuito recortador utilizado para limitar el valor de la tensión a la salida,  $v_O$ . Se aproxima el funcionamiento del diodo con un modelo lineal por tramos con una resistencia en directa,  $R_f=0 \Omega$ , una tensión umbral,  $V_\gamma=0,5 \text{ V}$ , y una tensión de disrupción,  $V_Z=\infty$ .

- a) Calcule y represente la función de transferencia  $v_O=f(v_I)$  en este caso. **(1 p)**.
- b) Represente la señal a la salida  $v_O(t)$  si la señal a la entrada,  $v_I(t)$ , es la señal triangular de la figura 1.2. **(0,5 p)**.
- c) Si se refina el modelo del diodo considerando el valor de  $R_f=20 \Omega$ , calcule la nueva expresión de la función de transferencia  $v_O=f(v_I)$  **(1 p)**.

DATOS:  $V_B = 1 \text{ V}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$

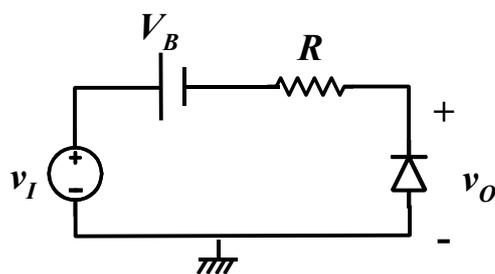


Figura 1.1

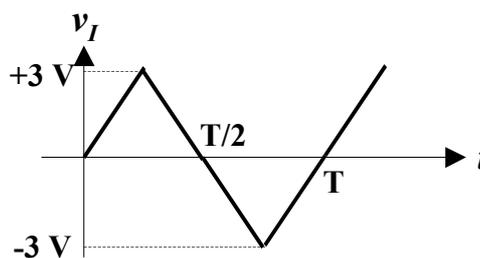
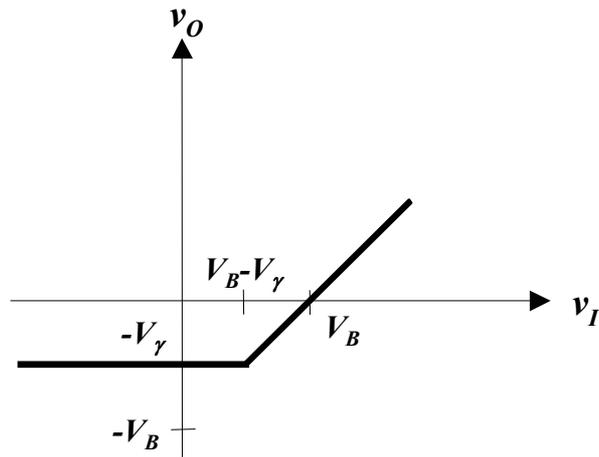


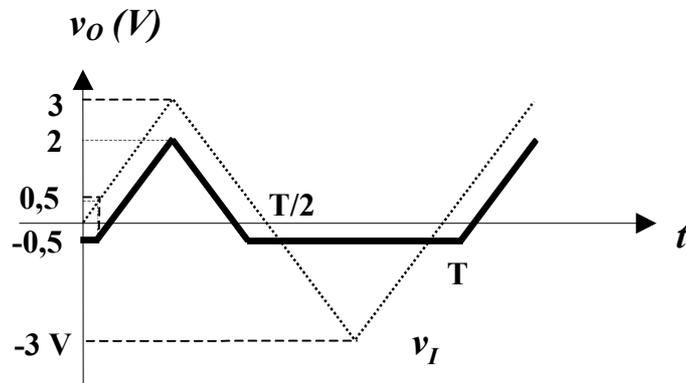
Figura 1.2

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1**

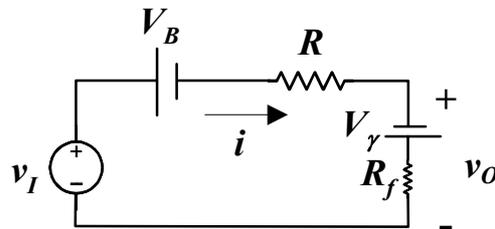
- a) Cuando el diodo está en corte,  $v_O = v_I - V_B = v_I - 1$ . Esto se cumple para  $v_O \geq -V_\gamma$ , luego la condición a la entrada es  $v_I \geq V_B - V_\gamma = 0,5$ . Para  $v_I \leq V_B - V_\gamma = 0,5 \text{ V}$  el diodo está en conducción, y  $v_O = -V_\gamma = -0,5 \text{ V}$ . Representándola:



b)



c) En el tramo en que el diodo está en corte ( $v_I \geq V_B - V_\gamma$ ) sigue siendo  $v_O = v_I - V_B = v_I - 1$ .  
 En el tramo en que el diodo conduce ( $v_I \leq V_B - V_\gamma$ ), el circuito equivalente es ahora el de la figura



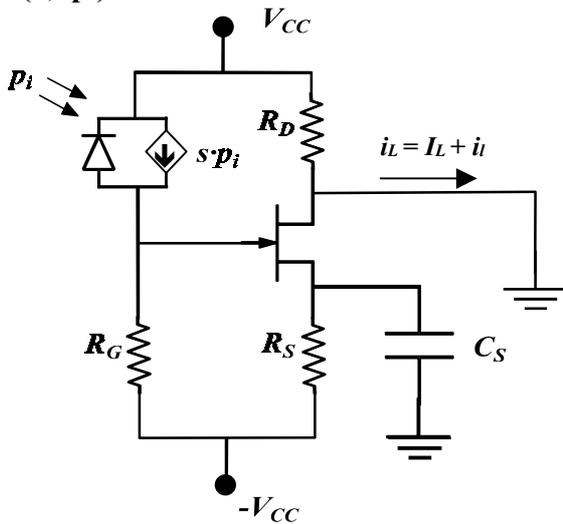
y tendremos 
$$v_O = -V_\gamma + R_f i = -V_\gamma + R_f \frac{v_I - V_B + V_\gamma}{R + R_f} = -0,5 + \frac{0,02}{1,02} (v_I - 0,5).$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 2.** La figura 2 muestra un circuito receptor de comunicaciones ópticas que emplea un fotodiodo como sensor y un amplificador de corriente realizado con un JFET de canal n. El fotodiodo, de sensibilidad  $s$ , equivale desde el punto de vista circuital, a un generador de corriente de valor  $s \cdot p_i$  (siendo  $p_i$  la potencia de la pequeña señal luminosa incidente) en paralelo con un diodo, como muestra la figura 2.

- a) En ausencia de señal ( $p_i = 0$ ), calcule  $R_S$  para que  $i_L = 0$ , comprobando que el diodo opera en OFF y el transistor en saturación (1 p.)
- b) Dibuje el circuito equivalente de pequeña señal para frecuencias medias (0,5 p.)
- c) Calcule la relación  $\frac{i_l}{p_i}$  de pequeña señal y frecuencias medias(0,5 p.)
- d) Halle el margen dinámico a la salida para la señal  $i_l$ , sabiendo que no está limitado por el diodo ni porque el JFET entre en región de corte o gradual, sino por la falta de validez del modelo de pequeña señal del transistor.

NOTA: Considere el margen dinámico de la corriente como la máxima amplitud simétrica de  $i_l$  que no produce distorsión. Suponga que el JFET es un dispositivo aproximadamente lineal si:  $|v_{gs}| < |V_{GS} - V_T|/5$  (0,5p.)



**DATOS:**

$V_{CC} = 12 \text{ V}$ ,  
 $R_D = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_G = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_S \rightarrow \infty$ .

Para el fotodiodo:  
 $V_\gamma = 0,5 \text{ V}$ ,  $V_Z \rightarrow \infty$ ,  
 $s = 0,5 \text{ A/W}$

Para el JFET en saturación se cumple que:

$$I_D = \kappa(V_{GS} - V_T)^2$$

con:  $\kappa = 1 \text{ mA/V}^2$ ,  $V_T = -6 \text{ V}$ ,  $V_A$  (tensión Early)  $\rightarrow \infty$ ,

Figura 2

**SOLUCIÓN AL EJERCICIO 2**

a) En ausencia de señal, como  $i_L = 0$ , se tiene que  $I_D = V_{CC} / R_D = 4 \text{ mA}$ . Por tanto:

$$I_D = \kappa(V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{\kappa}} = -4 \text{ V}$$

Así,

$$R_S = \frac{-V_{GS}}{I_D} = 1 \text{ k}\Omega$$

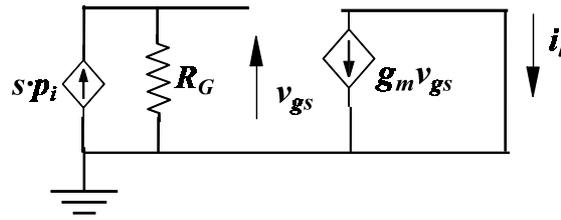
El diodo opera en OFF ya que

$$V_{Diodo} = V_G - V_{CC} = (-V_{CC}) - V_{CC} = -24 \text{ V} < 0,5 \text{ V} = V_\gamma$$

El transistor opera en saturación porque  $V_{GS} > V_T$  y

$$V_{DS} = V_D - V_S = 0 \text{ V} - (-12 \text{ V} + 4 \text{ V}) = 8 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 2 \text{ V}$$

- b) Teniendo en cuenta que el condensador  $C_S$  equivale a un cortocircuito a la frecuencia de trabajo, que el diodo está en OFF y el transistor en saturación:



- c) En primer lugar,  $g_m = 2\kappa(V_{GS} - V_T) = 4 \text{ mS}$   
Del análisis del circuito anterior:

$$\left. \begin{aligned} i_l &= -g_m v_{gs} \\ v_{gs} &= s p_i R_G \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{i_l}{p_i} = -s g_m R_G = -20 \text{ A/W}$$

- d) Como  $i_l = -g_m v_{gs} \Rightarrow |i_l| = g_m |v_{gs}| < g_m \frac{|V_{GS} - V_T|}{5} = 1,6 \text{ mA}$

### Ejercicio 3:

En el circuito de la figura 3 el amplificador operacional no está saturado y la tensión  $v_I \geq 0$

- a) Calcule la tensión de salida  $v_O$  en función de  $v_I$  suponiendo que el MOSFET de acumulación está trabajando en saturación. **(1 p.)**  
b) Calcular el rango de valores de  $v_O$  para los que el MOSFET está en conducción **(1 p.)**  
c) Calcular el rango de valores de  $v_O$  para los que el MOSFET está en saturación **(0,5 p.)**

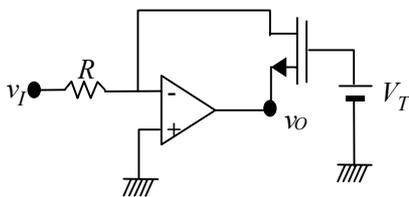


Figura 3

Datos: con el MOSFET en saturación se cumple:

$$i_D = k (v_{GS} - V_T)^2$$

$$k = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \quad R = 1 \text{ K}\Omega$$

### SOLUCIÓN EJERCICIO 3

a)  $i = \frac{v_I}{R} = k(v_{GS} - V_T)^2 = k(V_T - v_O - V_T)^2 = k v_O^2$

$$v_O = \sqrt{\frac{v_I}{kR}} = -\sqrt{v_I} \quad (v_O \text{ y } v_I \text{ en voltios})$$

b)  $v_{GS} > V_T \Rightarrow V_T - v_O > V_T \Rightarrow v_O < 0$

c)  $v_{DS} \geq V_{Dsat} = v_{GS} - V_T = V_T - v_O - V_T = -v_O$

De la condición,  $v_{DS} = 0 - v_O \geq -v_O$ , la igualdad, que es también parte de la condición de saturación, se cumple siempre. Por tanto, estará saturado si está en conducción  $v_O < 0$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**EJERCICIO 4:** El régimen de conmutación del circuito que se le propone en este ejercicio está limitado por el condensador  $C$  (figura 4), es decir, puede Ud. no considerar los efectos capacitivos del diodo y del transistor, ya que tienen una respuesta instantánea a la excitación que tenga lugar en sus respectivos terminales, es decir, que el transistor y el diodo trabajan en cuasi-estática.

En la base del transistor, en el instante  $t = 0$ , se aplica un escalón de tensión desde 0 a 5 V, como también se ilustra en la figura 4, que satura al transistor. El diodo es un diodo emisor de luz caracterizado por una tensión umbral,  $V_\gamma = 1,2$  V.

Para cada uno de los instantes o intervalos de tiempo que se le indican a continuación, diga si el diodo se encuentra encendido o apagado y razone la respuesta:

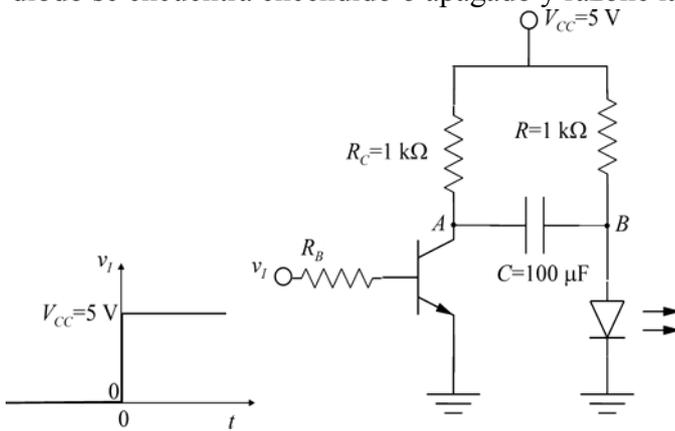


Figura 4

- a)  $t < 0$  (0,5 p.)
- b)  $t = 0^+$  (0,7 p.)
- c)  $t \rightarrow +\infty$  (0,5 p.)
- d) ¿Cuánto tiempo permanece el diodo apagado? (0,8 p.)

Datos: Tensión umbral de conducción del diodo  $V_\gamma = 1,2$  V. Para el transistor,  $V_{CE,sat} = 0,2$  V.

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4**

Caso	Instante o intervalo	Estado del diodo (¿encendido o apagado?)
a	$t < 0$	ENCENDIDO
b	$t = 0^+$	APAGADO
c	$t \rightarrow +\infty$	ENCENDIDO

- a) Caso  $t < 0$ : Circuito en estado estacionario.  $C$  aísla etapa del diodo y del transistor, diodo en ON (Si estuviese OFF, la tensión en sus bornas sería de 5 V  $>$   $V_\gamma$ ).
- b) Caso  $t = 0^+$ : Para  $t < 0$ , TRT cortado, tensión en bornas del condensador  $V_{BA} = 1,2 - 5 = -3,8$  V. En el instante  $t = 0^+$ , el TRT se satura. Como el condensador no puede cambiar inmediatamente la tensión en sus bornas:  $V_{BA}(0^+) = -3,8$  V  $= V_B(0^+) - 0,2$  V  $\Rightarrow V_B(0^+) = -3,6$  V  $<$   $V_\gamma$ , por lo que el diodo se encuentra apagado
- c) Igual que en el caso a)

d) Para  $0^+ < t < t_{ON}$ , donde  $t_{ON}$  es el tiempo que el diodo se encuentra apagado, el transistor se encuentra saturado y el diodo en abierto.  $V_A$  esta fijada a 0,2 V (tensión  $V_{CE,sat}$ ). La corriente que circula a través de la resistencia  $R$  carga al condensador según la ecuación:

$$\frac{V_{CC} - V_B}{R} = C \frac{d(V_B - V_{CE,sat})}{dt} \quad V_B(0^+) = -3,6 \text{ V}$$

cuya solución es

$$V_B(t) = V_{CC} - [V_{CC} - V_B(0^+)] \exp \frac{-t}{RC}$$

de donde

$$V_\gamma = V_{CC} - [V_{CC} - V_B(0^+)] \exp \frac{-t_{ON}}{RC} \Rightarrow t_{ON} = -RC \ln \frac{V_{CC} - V_\gamma}{V_{CC} - V_B(0^+)} = 82 \text{ ms}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>Nº DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

### ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de **enunciados** como para **borradores**, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de **enunciados** y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de **enunciados** es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para **borradores** **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS DE TEORÍA**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios, ni el de colecciones o libros (exclusivos) de problemas, apuntes de clase, fotocopias de transparencias, anotaciones en hojas sueltas, etc.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 28/09/00**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 3/10/00, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** Un diodo de GaAs (arseniuro de galio) posee una característica  $I$ - $V$  cuya medida experimental se muestra en la figura 1.1 mediante rombos. La ecuación que describe el funcionamiento de dicho diodo es:

$$I = I_0 \left( \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right) \quad [1]$$

donde  $m$  es un parámetro, en general, distinto de 1. Se pretende determinar los valores de  $I_0$  y  $m$ , para lo que es de gran ayuda redibujar la figura 1.1 cambiando  $I$  por  $\log I$  (logaritmo en base 10), resultando la figura 1.2.

Considerando un rango de tensiones suficientemente alto para poder despreciar el término  $-1$  de la ecuación [1], se han ajustado los puntos experimentales de la figura 1.2 por una línea recta para  $V < 0,9$  V. Se le pide:

- a) Calcular  $I_0$ . Note que al tratarse de un ajuste, la línea recta no pasa por  $V = 0, I = 0$ . (**1 p.**)
- b) Calcular el valor de  $m$  con la información suministrada en la figura 1.2 y sabiendo que  $kT/e = 25$  mV (**1 p.**)

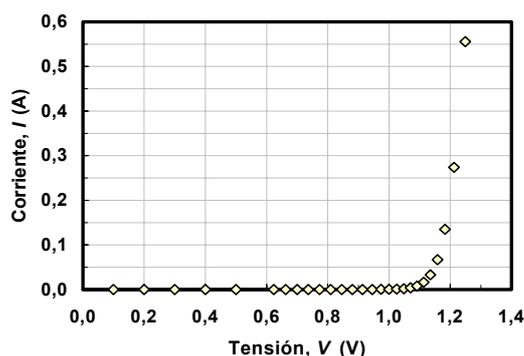


Figura 1.1

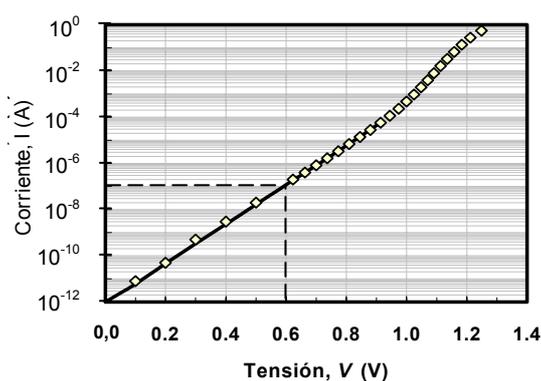


Figura 1.2

- c) Como se observa en la figura 1.2, si la línea recta de ajuste se prolonga para tensiones mayores que 0,9 V, la diferencia con los valores experimentales llega a ser importante. Esto es debido a que la ecuación [1] no incluye todos los fenómenos que ocurren en el diodo real. Uno de ellos es un efecto resistivo parásito, caracterizado por una resistencia que se representa mediante la letra  $R$ , se expresa en  $\Omega$  y que se desea añadir a la ecuación [1]. Sabiendo que con la inclusión de la resistencia  $R$ , el circuito equivalente del diodo real queda como un diodo (representado por la ecuación [1]) en serie con dicha resistencia  $R$ , indique cuál y por qué de las ecuaciones siguientes es la correcta (**0,5 p.**)

$$1) I = I_0 R \left( \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right) \quad 2) I = I_0 \left( \exp \frac{eV + R}{mkT} - 1 \right) \quad 3) I = I_0 \left( \exp \frac{e(V + IR)}{mkT} - 1 \right) \quad 4) I = I_0 \left( \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right) + R$$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

a) Despreciando el  $-1$  en la ecuación [1] y tomando logaritmos se obtiene:

$$\log I = \log I_0 + \log \left[ \exp \frac{eV}{mkT} \right]$$

$$\log I = \log I_0 + 0,434 \ln \left[ \exp \frac{eV}{mkT} \right] \text{ al cambiar la base del logaritmo}$$

$$\log I = \log I_0 + 0,434 \frac{eV}{mkT}$$

Considerando las condiciones del ajuste, para  $V=0$  ocurre que  $I=I_0=10^{-12}$  A.

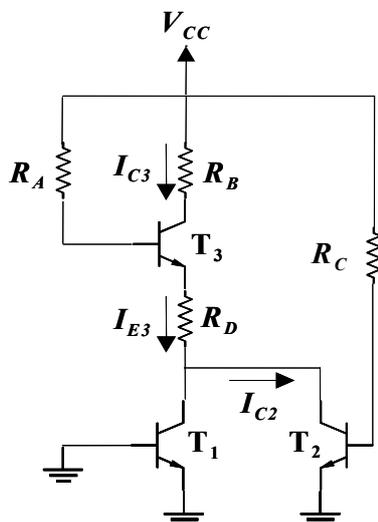
b) De la ecuación anterior, el término  $0,434 \cdot e/mkT$  es la pendiente de la figura 1.2. Calculando la pendiente de dicha gráfica se obtiene

$$m = 0,434 \frac{e}{kT} \frac{\Delta V}{\Delta \log I} = \frac{0,434 \times 0,6}{0,025 \times 5} = 2,08$$

c) La opción 3 es la única que dimensionalmente es correcta.

**Ejercicio 2.** Los tres transistores bipolares del circuito de la figura 2 son idénticos, y para este ejercicio se pueden caracterizar por un modelo lineal por tramos. Se sabe que  $T_2$  está en saturación.

- a) De los cuatro estados posibles del transistor (activa directa, saturación, corte y activa inversa), deduzca en cuál de ellos se encuentra  $T_1$ . **(0,5 p.)**
- b) Calcule el rango de valores de  $R_D$  para el que  $T_3$  está en activa. Si no resolvió el apartado a), suponga el transistor  $T_1$  en corte. **(1 p.)**
- c) Para  $R_D = 60 \Omega$  el transistor  $T_3$  está en saturación y se mide una caída de tensión en sus bornas de 0,7 V. Calcule los valores de las corrientes  $I_{C2}$  e  $I_{C3}$ . Compruebe que  $T_2$  y  $T_3$  están en saturación. **(1 p.)**



DATOS:

$$V_{CC} = 5 \text{ V}$$

$$R_A = 1,7 \text{ K}\Omega$$

$$R_B = 0,4 \text{ K}\Omega$$

$$R_C = 6 \text{ K}\Omega$$

De los transistores:

$$\beta = 100$$

$$V_{\gamma E} = V_{BE(ON)} = 0,7 \text{ V}$$

$$V_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

Figura 2

**SOLUCION EJERCICIO 2:**

a)  $V_{BE} = 0 < V_{\gamma E}$ ,  $V_{BC} = -V_{CE2} = -0,2 \text{ V} < V_{\gamma C} = V_{\gamma E} - V_{CEsat} = 0,5 \text{ V}$ . Ambas uniones en inversa, luego  $T_1$  está en corte.

b)  $T_3$  en activa  $\Rightarrow I_{C3} = \beta I_{B3}$ ,  $I_{E3} = (\beta + 1)I_{B3}$ . Resolviendo:

$$V_{CC} = R_A I_{B3} + V_{BE3} + R_D (\beta + 1)I_{B3} + V_{CE2} \Rightarrow I_{B3} = \frac{V_{CC} - V_{\gamma E} - V_{CEsat}}{R_A + R_D (\beta + 1)}$$

$$V_{CC} = R_B \beta I_{B3} + V_{CE3} + R_D (\beta + 1)I_{B3} + V_{CE2} \Rightarrow V_{CE3} = V_{CC} - V_{CEsat} - I_{B3} (R_B \beta + R_D (\beta + 1))$$

Para que se cumpla  $T_3$  en activa:

$$I_{B3} > 0 \Rightarrow V_{CC} > V_{\gamma E} + V_{CEsat} \Rightarrow OK$$

$$V_{CE3} > V_{CEsat} \Rightarrow V_{CC} - V_{CEsat} - \frac{V_{CC} - V_{\gamma E} - V_{CEsat}}{R_A + R_D (\beta + 1)} (R_B \beta + R_D (\beta + 1)) > V_{CEsat}$$

Despejando,  $R_D > 3,09 \text{ K}\Omega$

c)

$$I_{E3} = \frac{V_{R_D}}{R_D} = 11,67 \text{ mA} = I_{C2}$$

$$V_{CC} = R_B I_{C3} + V_{CE3} + V_{R_D} + V_{CE2} \Rightarrow I_{C3} = \frac{V_{CC} - 2V_{CEsat} - V_{R_D}}{R_B} = 9,75 \text{ mA}$$

Para comprobar hipótesis, calculamos:

$$I_{B3} = I_{E3} - I_{C2} = 1,92 \text{ mA}$$

$$I_{B2} = \frac{V_{CC} - V_{\gamma E}}{R_C} = 0,72 \text{ mA}$$

Y se comprueba:

$I_{B2} > 0$ ,  $I_{C2} < \beta I_{B2}$ , luego  $T_2$  en saturación

$I_{B3} > 0$ ,  $I_{C3} < \beta I_{B3}$ , luego  $T_3$  en saturación

**Ejercicio 3.** En el circuito inversor CMOS de la figura 3.1 los dos MOSFET ( $M_1$  y  $M_2$ ) tienen el mismo valor absoluto de la tensión umbral  $|V_{T1}| = |V_{T2}|$  y la misma constante  $\kappa_p = \kappa_n$ . Los dos son normalmente off. Cuando están trabajando en saturación cumplen las respectivas ecuaciones que se indican en las figuras 3.2 y 3.3. Calcular:

a) La región del plano ( $v_I, v_O$ ) en la que los dos MOSFET trabajan en saturación. **(1 p.)**

b) La expresión de  $v_I$  en función de  $v_O$  cuando los dos MOSFET están trabajando en saturación y la corriente  $i=0$ . **(1 p.)**

c) Dibuje en el plano ( $v_I, v_O$ ) la región calculada en a) y la característica de transferencia calculada en b) **(0,5 p.)**

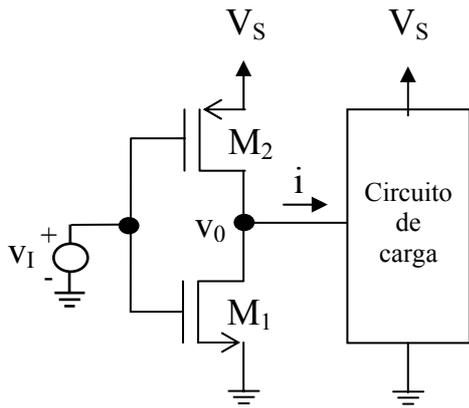
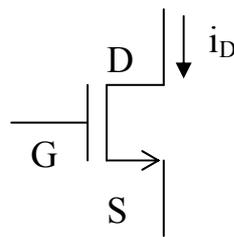
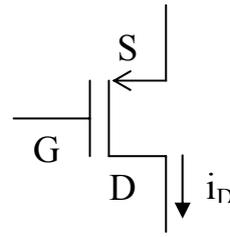


Figura 3.1



$$i_D = \kappa (v_{GS} - |V_T|)^2$$

Figura 3.2



$$i_D = \kappa (v_{SG} - |V_T|)^2$$

Figura 3.3

DATOS:  $\kappa = 1 \text{ mA/V}^2$ ,  $|V_T| = 1\text{V}$ ,  $V_S = 10\text{V}$ ,

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

a) La condición de saturación para  $M_1$  es

$$v_{DS} \geq V_{DSsat} = v_{GS} - |V_T|, \text{ es decir, } v_O \geq v_I - |V_T|$$

Para  $M_2$  la misma condición es

$$v_{SD} \geq V_{SDsat} = v_{SG} - |V_T|, \text{ es decir, } V_S - v_O \geq V_S - v_I - |V_T|$$

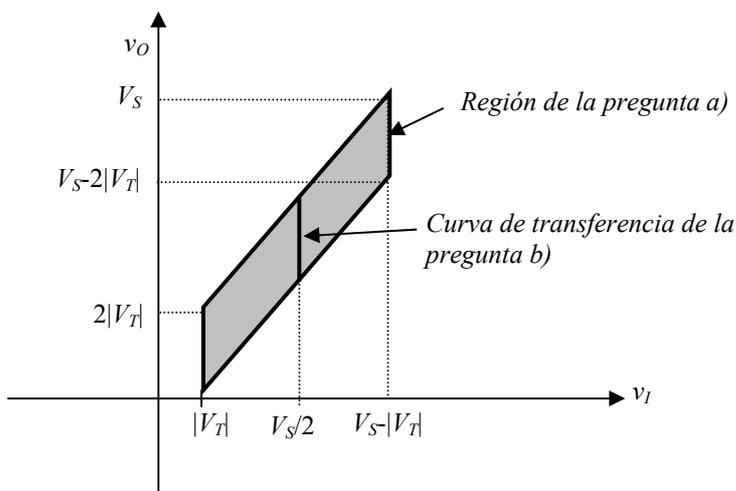
Ambas desigualdades se combinan en:  $v_I + |V_T| \geq v_O \geq v_I - |V_T|$ , que define una banda en el plano  $(v_I, v_O)$ .

Además  $v_I \geq |V_T|$  para que  $M_1$  esté en conducción y  $V_S - |V_T| \geq v_I$  para que  $M_2$  esté en conducción.

b) Por la configuración del circuito y la condición  $i=0$  se deduce que la corriente de drenador de los dos MOSFET es igual. Para estar en saturación hay que estar en conducción es decir para  $M_1$  se debe cumplir  $v_{GS} \geq |V_T|$  y para  $M_2$  se debe cumplir  $v_{SG} \geq |V_T|$ . Puesto que  $K_p = K_n$ , de las expresiones de las corrientes de drenador y de las anteriores consideraciones se deduce que

$$v_{SG} - |V_T| = v_{GS} - |V_T|, \text{ es decir } V_S - v_I - |V_T| = v_I - |V_T| \text{ de donde se deduce } v_I = V_S/2 = 5\text{V}, \text{ que es la función de transferencia buscada}$$

c)



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>Nº DNI</b>	

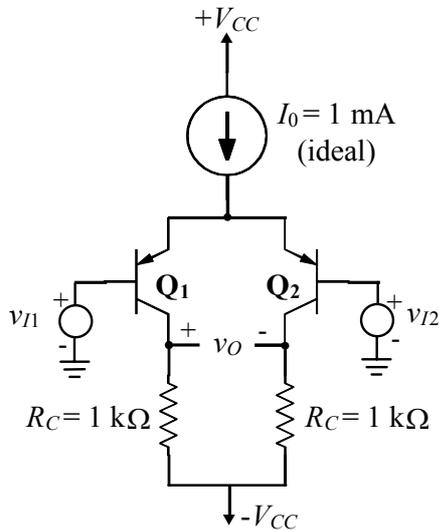


Figura 4

**Ejercicio 4.** Los dos transistores bipolares del amplificador diferencial con salida diferencial de la figura 4 trabajan en activa directa. Ambos están a la misma temperatura pero no son iguales: para Q1,  $I_{S1} = \alpha_F I_{ES1} = 0,9 \cdot 10^{-14}$  A, mientras que, para Q2,  $I_{S2} = \alpha_F I_{ES2} = 1,1 \cdot 10^{-14}$  A. Por tanto el circuito no es simétrico.

- a) Se aplica a las dos entradas la misma tensión  $v_{I1} = v_{I2} = v_A$ . Exprese la tensión de salida  $v_O$  en función de  $v_A$ . **(0,8 p.)**
- b) Se aplica a las dos entradas una (pequeña) señal común  $v_{I1}(t) = v_{I2}(t) = v_c(t)$ . A partir del resultado del apartado a), sin resolver ningún circuito, calcule la ganancia  $A_C \equiv \frac{v_o(t)}{v_c(t)}$ , siendo  $v_o(t)$  la parte alterna de la tensión de salida. **(0,4 p.)**

Por último, las entradas se excitan con una (pequeña) señal diferencial  $v_{i1}(t) = -v_{i2}(t) = v_d(t)/2$ .

c) Dibuje el cto equivalente de pequeña señal **(0,7 p.)**

d) Calcule la ganancia  $A_D \equiv \frac{v_o(t)}{v_d(t)}$  **(0,6 p.)**

DATOS:  $\beta_1 = \beta_2 = \beta \gg 1$ ,  $r_\pi = \beta \frac{kT/e}{I_C}$ ,  $r_o \rightarrow \infty$ ,  $kT/e = 0,025$  V

NOTA: Considere los efectos capacitivos de los transistores despreciables.

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4**

a) Con ambos transistores en activa directa, las ecuaciones de Ebers-Moll se escriben:

$$\left. \begin{aligned} i_{C1} &\approx I_{S1} \exp\left(\frac{e v_{EB1}}{kT}\right) \\ i_{C2} &\approx I_{S2} \exp\left(\frac{e v_{EB2}}{kT}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{i_{C1}}{i_{C2}} = \frac{I_{S1}}{I_{S2}}$$

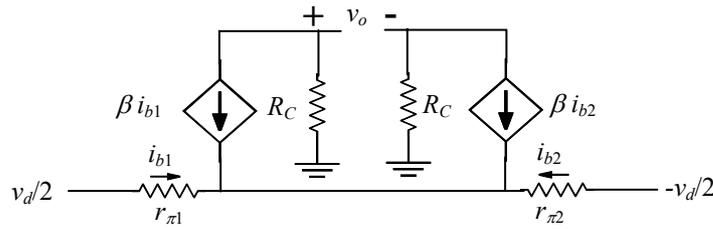
Ya que los dos transistores tienen la misma  $v_{EB}$ . Y la ecuación en el nodo de emisor:

$$I_0 = i_{E1} + i_{E2} \approx i_{C1} + i_{C2} \Rightarrow \begin{cases} i_{C1} \approx I_0 \frac{I_{S1}}{I_{S1} + I_{S2}} \\ i_{C2} \approx I_0 \frac{I_{S2}}{I_{S1} + I_{S2}} \end{cases}$$

Y por fin  $v_O = R_C (i_{C1} - i_{C2}) \approx R_C I_0 \frac{I_{S1} - I_{S2}}{I_{S1} + I_{S2}} = -0,1$  V, independiente de  $v_A$

b) La tensión de salida es independiente del voltaje común aplicado a las entradas, de forma que, para entrada común, la señal de salida es nula y  $A_C = 0$

c) El circuito equivalente de pequeña señal no puede simplificarse pues no es simétrico



d) En el nodo de emisor  $(\beta + 1)i_{b1}(t) = -(\beta + 1)i_{b2}(t) \Rightarrow i_{b1}(t) = -i_{b2}(t)$ , Además:

$$\begin{aligned} \frac{v_d(t)}{2} &= r_{\pi 1} i_{b1}(t) - r_{\pi 2} i_{b2}(t) - \frac{v_d(t)}{2} \Rightarrow v_d(t) \approx i_{b1}(t)(r_{\pi 1} + r_{\pi 2}) = \\ &= i_{b1}(t) \beta \left( \frac{kT/e}{I_{C1}} + \frac{kT/e}{I_{C2}} \right) = \beta i_{b1}(t) \frac{kT/e}{I_0} \left( 2 + \frac{I_{S2}}{I_{S1}} + \frac{I_{S1}}{I_{S2}} \right) \end{aligned}$$

Y a la salida:

$$v_o(t) = R_C(\beta i_{b2}(t) - \beta i_{b1}(t)) \approx -2R_C \beta i_{b1}(t) \Rightarrow A_D \approx \frac{-2R_C I_0}{kT/e \left( 2 + \frac{I_{S2}}{I_{S1}} + \frac{I_{S1}}{I_{S2}} \right)} = -19,8$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS DE TEORÍA**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios, ni el de colecciones o libros (exclusivos) de problemas, apuntes de clase, fotocopias de transparencias, anotaciones en hojas sueltas, etc.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 5/02/01**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 9/02/01, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** Para una determinada aplicación se desea utilizar como generador de energía eléctrica la célula solar que muestra la figura 1.a. Para ciertas condiciones de temperatura y radiación solar (que se estima que serán similares a las de operación real) la célula puede modelarse como un generador de corriente en paralelo con un diodo aproximado por un modelo lineal por tramos, tal y como muestra la figura 1.b. La característica  $I$ - $V$  como componente de dos terminales de la célula tiene el aspecto de la figura 1.c. Para las condiciones mencionadas, se le pide calcular de forma razonada:

- a) La corriente en el punto A de la figura 1.c, que es la que produce la célula cuando se cortocircuitan sus terminales ( $V = 0$ ). Indique el estado en que opera el diodo en dicho punto A. **(0,6 p.)**
- b) La tensión en el punto B de la figura 1.c, que es la que aparece en bornas de la célula cuando se deja en circuito abierto ( $I = 0$ ). Indique el estado en que opera el diodo en dicho punto B. **(0,8 p.)**
- c) La potencia máxima que puede generar la célula, que se obtiene cuando trabaja en el punto C de la figura 1.c. **(0,6 p.)**
- d) La resistencia de carga que habría que poner en los terminales de la célula para operarse en el punto C de la figura 1.c. **(0,5 p.)**

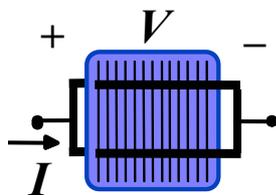


Figura 1.a

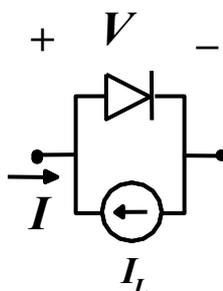


Figura 1.b

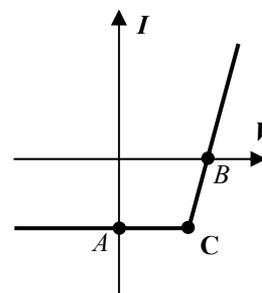


Figura 1.c

DATOS:  $I_L = 2$  A. Modelo lineal por tramos del diodo:  $V_\gamma = 0,5$  V;  $r_f = 0,1$   $\Omega$ .

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

---

- a) Para  $V = V_D = 0$ , el diodo está en OFF, e  $I_D = 0$ . Por tanto  $I = -I_L = -2$  A.
- b) Cuando  $I = 0$ , la corriente por el diodo es  $I_D = I_L = 2$  A  $> 0$ , por lo que está en ON. Así, su tensión en bornas es:  
$$V = V_D = V_\gamma + r_f I_D = 0,5 \text{ V} + 0,1 \Omega \times 2 \text{ A} = 0,7 \text{ V}$$
- c) En el punto C el diodo está en el umbral entre OFF y ON por lo que  $I_D = 0$  y  $V = V_D = V_\gamma$ . Así la potencia disipada es  $P_{dis} = I \times V = -2 \text{ A} \times 0,5 \text{ V} = -1 \text{ W}$ , por lo que la potencia generada es  $P_{gen} = -P_{dis} = 1 \text{ W}$ .
- d) La resistencia de carga necesaria viene dada por:

$$R = \frac{V}{-I} = \frac{0,5 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 0,25 \Omega$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 2.** El circuito de la figura 2, formado por las resistencias de valor  $R_B$  y los dos transistores, se excita con una pequeña señal  $v_i$  y ataca una resistencia de carga  $R$ .

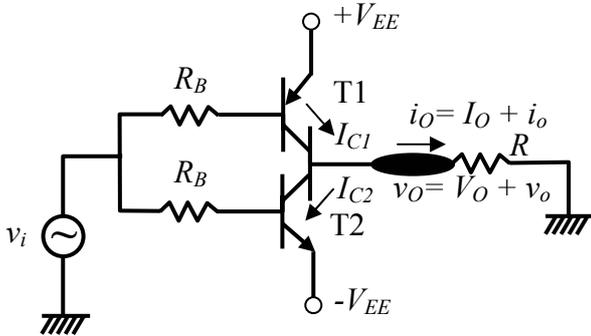


Figura 2

- Calcule, en continua, los valores de corriente de colector de T1 y T2,  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$ , y la corriente  $I_0$  que atraviesa la resistencia de carga. **(1 p.)**
- Calcule la ganancia de tensión  $\frac{v_o}{v_i}$  de pequeña señal. **(1 p.)**
- ¿Cuál es el margen dinámico a la salida, sabiendo que viene limitado por la saturación de los transistores? **(0,5 p.)**

DATOS:  $V_T = 0,025 V$ ;  $V_{EE} = 5 V$ ;  $R_B = 4,3 K\Omega$ ;  $r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$ ;  $R = 43,25 \Omega$

T1  $\beta_1 = \beta = 100$ ;  $V_{ECsat} = 0,2 V$ ;  $V_{EB1} = 0,7 V$

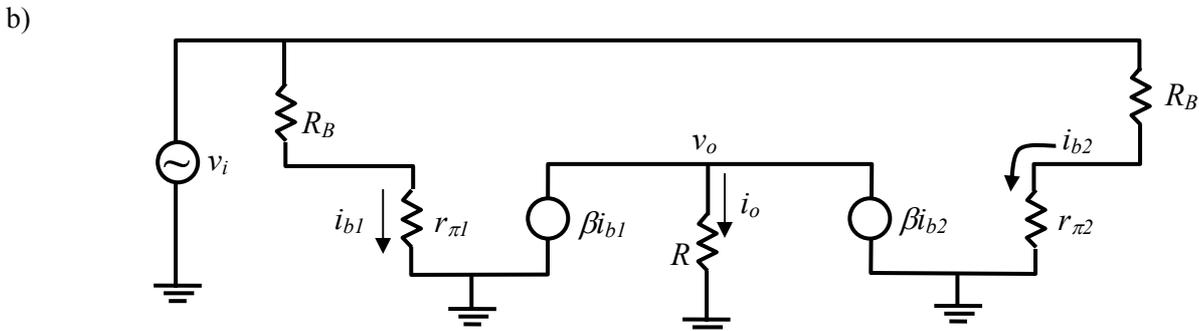
T2  $\beta_2 = \beta = 100$ ;  $V_{CESat} = 0,2 V$ ;  $V_{BE2} = 0,7 V$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**

a) En polarización

$$I_{B1} = \frac{V_{EE} - V_{EB1}}{R_B} = I_{B2} = \frac{V_{EE} - V_{BE2}}{R_B} = 1 mA$$

$$I_{C1} = I_{C2} = 100 mA \Rightarrow I_0 = 0$$



$$r_{\pi1} = r_{\pi2} = \frac{V_T}{I_B} = 25 \Omega$$

$$i_o = -\beta(i_{b1} + i_{b2}) = -\beta \frac{2v_i}{R_B + r_\pi}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{2\beta R}{R_B + r_\pi} = -2$$

c) En reposo,  $V_0=0$ . Si T1 se satura, a la salida la señal es  $v_0=4,8 V$ . Si es T2,  $v_0=-4,8 V$ . Por tanto, el margen dinámico es 4,8 V.

**Ejercicio 3.** En el circuito amplificador de la figura 3:

- Calcule el punto de trabajo del JFET y demuestre que está en saturación. **(1 p.)**
- Dibuje el circuito equivalente en pequeña señal y a frecuencias medias. **(0,5 p.)**
- Calcule la transconductancia,  $g_m$ . **(0,3 p.)**
- Calcule la ganancia en tensión,  $v_o/v_i$ . **(0,7 p.)**

Realice las simplificaciones que considere oportunas, explicándolas.

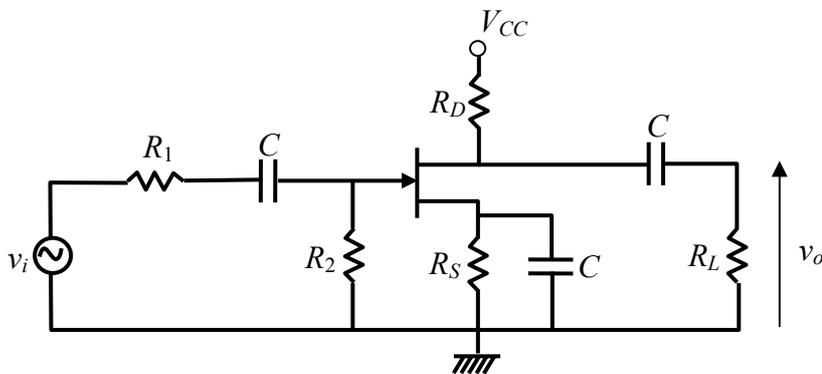


Figura 3

DATOS

Del circuito:  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ;  $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$ ;  
 $R_S = 0,3 \text{ k}\Omega$ ;  $R_D = 1 \text{ k}\Omega$ ;  $R_L = 20 \text{ k}\Omega$ ;  
 $V_{CC} = 10 \text{ V}$ ;  $C \rightarrow \infty$ .

Del JFET:  $|V_t| = 4 \text{ V}$ ,  $k = 0,625 \text{ mA/V}^2$ ,  
 Ec. de saturación:  $I_D = k(V_{GS} - V_t)^2$

### SOLUCIÓN EJERCICIO 3:

a) Es un JFET de canal n, por tanto,  $V_t = -4 \text{ V}$ .

Suponiendo que el JFET está en saturación, se obtiene:

$$I_D = k(V_{GS} - V_t)^2 = k(-V_S - V_t)^2 = k(-I_D R_S - V_t)^2 \Rightarrow kR_S^2 I_D^2 + (2kR_S V_t - 1)I_D + kV_t^2 = 0$$

De las dos soluciones, la válida es  $I_D = 4,4 \text{ mA}$ , pues es la que hace  $V_{GS} = -I_D R_S = -1,32 \text{ V} > V_t$

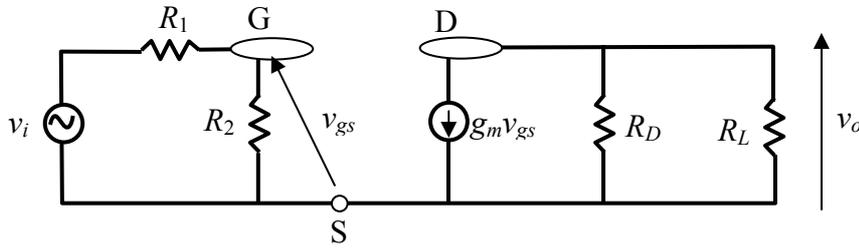
Resolviendo la malla de salida se obtiene:

$$V_{DS} = V_{CC} - I_D(R_D + R_S) = 4,28 \text{ V}$$

Si está en saturación se ha de cumplir que  $V_{DS} > V_{DSsat} = V_{GS} - V_t = 2,68 \text{ V}$ , lo que, efectivamente, se cumple.

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

b)



c) 
$$g_m = \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_Q = 2k(V_{GS} - V_t) = 3,35 \text{ mS}$$

d) 
$$\frac{v_o}{v_i} = - \frac{g_m v_{gs} (R_D // R_L)}{v_{gs} \frac{R_1 + R_2}{R_2}} \cong - \frac{g_m v_{gs} R_D}{v_{gs}} = -3,35$$

**Ejercicio 4.** El circuito de la Figura 4 es un amplificador diferencial en que los dos transistores son idénticos y trabajan a la misma temperatura.

a) Calcule el punto de trabajo en continua ( $I_C$ ,  $V_{CE}$ ) de ambos transistores y demuestre que no depende del valor de  $R_E$  ni de  $R_L$ . **(0,9 p.)**

Para una excitación diferencial de pequeña señal como la mostrada en la figura:

b) Dibuje el circuito equivalente de pequeña señal, utilizando las propiedades de simetría del circuito y la excitación. **(0,8 p.)**

c) Calcule el margen de valores posibles de la ganancia  $A_v = v_o/v_d$  si  $R_E$  se puede variar entre 0 (cortocircuito) e  $\infty$  (circuito abierto) **(0,8 p.)**

DATOS:  $V_{CC} = 9 \text{ V}$ ;  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ ;  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ ;  $I_0 = 0,5 \text{ mA}$

Las fuentes de corriente continua son ideales.

$V_{BE} \cong 0,6 \text{ V}$ ,  $V_T = 0,025 \text{ V}$ ,  $\beta = 100$ ,  $r_\pi = \beta V_T / I_C$ ,  $r_o \rightarrow \infty$

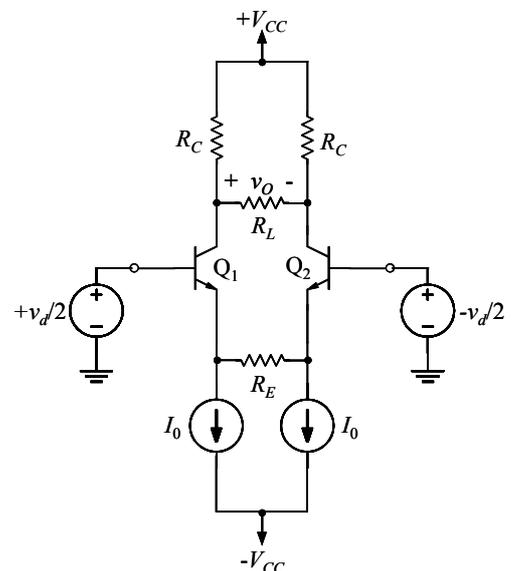


Figura 4

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4:**

a) Se supone que los transistores funcionan en activa directa. Por la simetría del circuito, no circula corriente continua ni por  $R_L$  ni por  $R_E$ , por tanto:

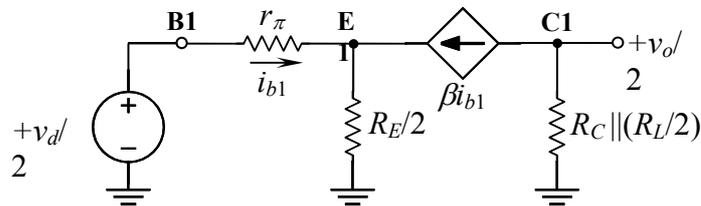
$$0,5 \text{ mA} = I_0 = I_{E1} = I_{E2} \cong I_{C1} = I_{C2}$$

También las tensiones colector - emisor son iguales:

$$V_{CE2} = V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = V_{CC} - I_{C1}R_C - (-V_{BE1}) = 9 - 5 + 0,6 = 4,6 \text{ V}$$

De estos resultados se desprende que el punto de polarización no depende de  $R_E$  o  $R_L$  y que, en efecto, los transistores trabajan en la región activa directa.

b) En los puntos medios de las resistencias  $R_E$  y  $R_L$  no hay señal diferencial, y, por ejemplo, la mitad izquierda del circuito queda:



Con  $r_\pi = 100 \cdot 0,025 / 0,5 = 5 \text{ k}\Omega$

$$c) A_v = \frac{v_o}{v_d} = \frac{v_o/2}{v_d/2} = \frac{-\beta \left( \frac{R_L}{2} \parallel R_C \right)}{r_\pi + (\beta + 1) \frac{R_E}{2}} \begin{cases} = 0 (R_E \rightarrow \infty) \\ = \frac{-100 \times 0,5 \parallel 10}{5} = -9,52 (R_E = 0) \end{cases}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS DE TEORÍA**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios, No se permite la consulta de escritos en hojas sueltas: apuntes, fotocopias de transparencias, etc., ni de colecciones (exclusivas) de problemas, estén o no editadas en forma de libro.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 26/06/01**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 3/07/01, a las 12:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** El circuito señalizador de la figura 1.1 consta de un diodo emisor de luz naranja y otro infrarrojo. Dichos diodos se pueden modelar linealmente por tramos en régimen cuasi-estático mediante los parámetros indicados en los datos al final del enunciado. Por la entrada  $v_I(t)$  se introduce un escalón de tensión de  $-4V$  a  $+4V$  como indica la figura 1.2. Despreciando los efectos capacitivos de los diodos y suponiendo que conmutan instantáneamente, rellene la tabla adjunta indicando si los diodos se iluminan o no y calcule la tensión  $v_o(t)$  con el sentido indicado en la figura 1.1 cuando la tensión de entrada vale:

- a)  $-4 V$  (**0,7 pts**)
- b)  $4 V$  (**0,7 pts**)

Suponga ahora que ambos diodos emisores de luz tienen una capacidad en directa (ON) de  $1 nF$  y una capacidad en inversa (OFF) de  $10 pF$ , por lo que la conmutación ya no es instantánea. Si en  $t=0$  se produce la conmutación de  $-4 V$  a  $4 V$ :

- c) Dibuje el circuito que gobierna el transitorio justo después de  $t=0^+$ . (**0,6 pts**).
- d) Como consecuencia de este transitorio, ¿qué diodo cambia antes su estado (de encendido a apagado o viceversa): el naranja o el infrarrojo? (**0,5 pts**). Razone su respuesta sin resolver ecuaciones diferenciales.

Datos:

Diodo infrarrojo:  $V_{\gamma_i} = 0,7V, R_{f_i} = 10\Omega$ ; si  $v_{D_i}(t) < V_{\gamma_i} \Rightarrow$  circuito abierto

Diodo naranja:  $V_{\gamma_n} = 1,5V, R_{f_n} = 25\Omega$ ; si  $v_{D_n}(t) < V_{\gamma_n} \Rightarrow$  circuito abierto

$R = 100 \Omega$

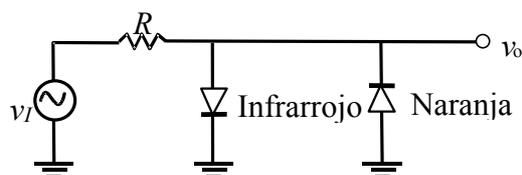


Figura 1.1

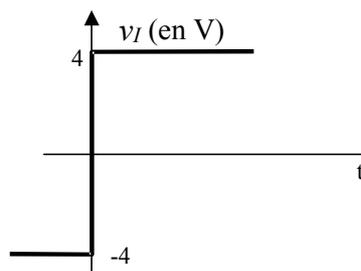


Figura 1.2

## SOLUCIÓN EJERCICIO 1:

$v_I(t)$ (V)	$v_O(t)$ (V)	Diodo infrarrojo (sí/no)	Diodo naranja (sí/no)
-4	-2	no	sí
4	1	sí	no

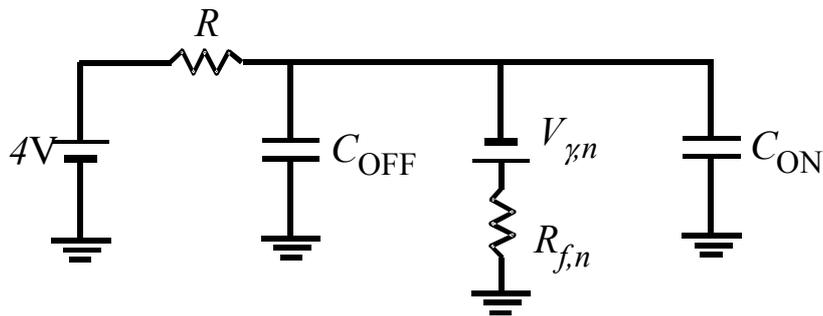
a) Hipótesis: Diodo infrarrojo no conduce y el naranja sí:

$$I = (4 - V_{\gamma n}) / (R + R_{fn}) = 20 \text{ mA}; v_o(t) = -V_{\gamma n} - I \cdot R_{fn} = -2 \text{ V}, \text{ lo que confirma la hipótesis}$$

b) Hipótesis: Diodo infrarrojo conduce y el naranja no:

$$I = (4 - V_{\gamma i}) / (R + R_{fi}) = 30 \text{ mA}; v_o(t) = V_{\gamma i} + I \cdot R_{fi} = 1 \text{ V}, \text{ lo que confirma la hipótesis}$$

c)



d) El diodo naranja, ya que partiendo de la tensión inicial del transitorio (-2 V) se llega antes a -1,5 V (tensión umbral del naranja) que a (+0,7 V) tensión umbral del infrarrojo.

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 2.** El conjunto de tres transistores bipolares T1, T2 y T3 acoplados según muestra la figura 2.1 funciona como el transistor npn equivalente representado en la figura 2.2. Se le pide calcular:

- a) El parámetro  $\beta$  del transistor equivalente, definido como el cociente  $I_C/I_B$  de las corrientes indicadas en la figura 2.2 cuando T1, T2 y T3 operan en activa (0,9 p)
- b) La mínima tensión  $V_{CE}$  en el transistor equivalente para la que T1, T2 y T3 operan en activa con  $I_B > 0$ . Considere para este apartado el modelo lineal por tramos para los transistores (0,7 p)
- c) El valor de  $V_{BE2}-V_{BE1}$  cuando T1, T2 y T3 operan en activa. Considere para este apartado el modelo de Ebers-Moll para los transistores en activa, y exprese el resultado con tres cifras significativas (0,9 p)

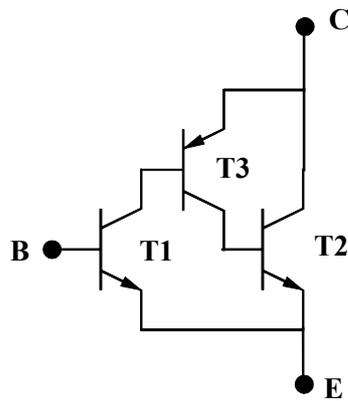


Figura 2.1

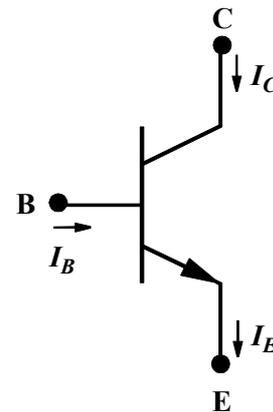


Figura 2.2

DATOS:  $V_t = 25 \text{ mV}$

Para todos los BJT:  $\beta=10, |V_A| \rightarrow \infty$

- o Modelo lineal por tramos:  $V_{\gamma E} \approx 0,7 \text{ V}, |V_{CE,sat}| \approx 0,2 \text{ V}$
- o Modelo de Ebers-Moll para activa:  $I_C = \beta I_B, I_B = I_0 \exp(|V_{BE}|/V_t)$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**

a) Como  $I_{C1} = I_{B3}$  y  $I_{B2} = I_{C3}$ :

$$\left. \begin{aligned} I_{C1} &= \beta I_B \\ I_{E3} &= (\beta + 1) I_{C1} \\ I_{C3} &= \beta I_{C1} \\ I_{C2} &= \beta I_{C3} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_C = I_{E3} + I_{C2} = (\beta^3 + \beta^2 + \beta) I_B = 1110 I_B \Rightarrow \beta \text{ equivalente} = 1110$$

b)

$$\left. \begin{aligned} V_{CE2} = V_{CE} &\geq V_{CE,sat} \\ V_{CE1} = V_{EC3} = V_{CE} - V_{\gamma E} &\geq V_{CE,sat} \Rightarrow V_{CE} \geq V_{CE,sat} + V_{\gamma E} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{CE} \geq V_{CE,min} \equiv V_{CE,sat} + V_{\gamma E} = 0,9 \text{ V}$$

c)

$$\left. \begin{aligned} I_{B1} &= I_0 \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_t}\right) = I_B \\ I_{B2} &= I_0 \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_t}\right) = \beta^2 I_B \end{aligned} \right\} \Rightarrow \exp\left(\frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{V_t}\right) = \beta^2 \Rightarrow V_{BE2} - V_{BE1} = 2V_t \text{ Ln } \beta = 115 \text{ mV}$$

**Ejercicio 3.** El circuito de la figura 3 representa un amplificador seguidor de fuente realizado con JFETs, en el que  $Q_2$  actúa como fuente de corriente. Considerando que ambos transistores son idénticos y trabajan en saturación, se pide:

- Valor de continua de la corriente de drenador  $I_{D2}$  y de la tensión puerta-fuente  $V_{GS}$  para cada uno de los transistores **(0,5 p)**. Considere para este apartado  $V_A \rightarrow \infty$
- En pequeña señal, resistencia equivalente de la fuente de corriente  $Q_2$  vista desde su drenador **(0,5 p)**.
- Ganancia de tensión en pequeña señal  $v_o/v_i$  **(1 p)**.
- Resistencia de salida en pequeña señal  $R_{out}$  **(0,5 p)**.

DATOS:  $k=1 \text{ mA/V}^2$ ,  $|V_t|=1 \text{ V}$ , Tensión de Early  $V_A=50 \text{ V}$ .

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_D}$$

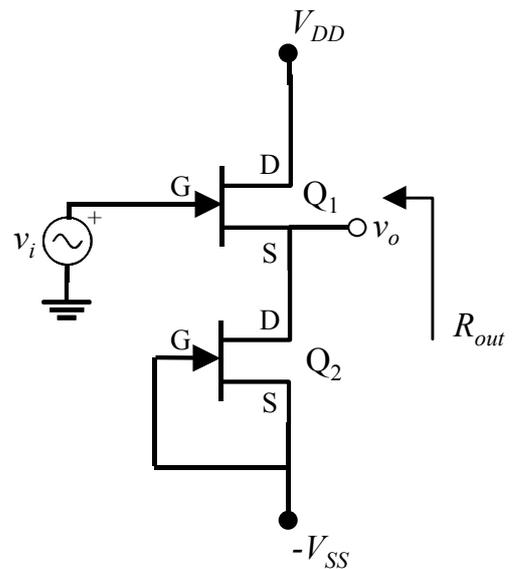


Figura 3

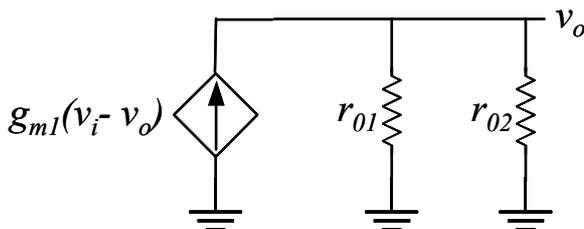
**SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

a)  $V_{GS2}=0 \text{ V}$ ;  $I_{D2}=k(V_{GS2}-V_t)^2=kV_t^2=1 \text{ mA}$   
 Además,  $I_{D1}=I_{D2}$  luego  $V_{GS1}=0$

b) Los parámetros de pequeña señal de ambos transistores son  $g_m = 2\sqrt{kI_D} = 2\text{mS}$ ;  $r_o = \frac{V_A}{I_D} = 50 \text{ k}\Omega$

Al ser  $v_{gs2}=0$ , la resistencia equivalente de pequeña señal de  $Q_2$  es  $r_{o2}$

c) En pequeña señal:



$$v_o = g_{m1}(v_i - v_o)(r_{o1} // r_{o2}) \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_{m1}(r_{o1} // r_{o2})}{1 + g_{m1}(r_{o1} // r_{o2})} = 0,98$$

d) Para calcular la resistencia de salida, hacemos  $v_i=0$  en el circuito anterior, con lo cual la fuente de corriente dependiente está controlada por su propia tensión, y por tanto es una resistencia de valor  $\frac{1}{g_{m1}}$ .

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

$$\text{Luego } R_{out} = r_{o1} // r_{o2} // \frac{1}{g_{m1}} = 490 \Omega$$

**Ejercicio 4.** Para el amplificador diferencial de la figura, se pide:

- Calcular el nivel de continua a la salida y comprobar que los transistores están saturados (**0,5 p**)
- Calcular la ganancia en modo común ( $A_{Vc} = v_o/v_{ic}$ , con  $v_{i1} = v_{i2} = v_{ic}$ ), siendo  $v_o$  el voltaje de pequeña señal a la salida (**1,0 p**)
- Calcular la ganancia en modo diferencial ( $A_{Vd} = v_o/v_{id}$ , con  $v_{i1} = -v_{i2} = v_{id}/2$ ) (**1,0 p**)

$$V_{DD} = 5 \text{ V}; R_D = 7 \text{ k}\Omega; I_0 = 1 \text{ mA}$$

$$\text{Transistores iguales: } k = 1 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-2}; V_T = 1 \text{ V}; V_A \rightarrow \infty$$

Las fuentes de corriente continua son ideales

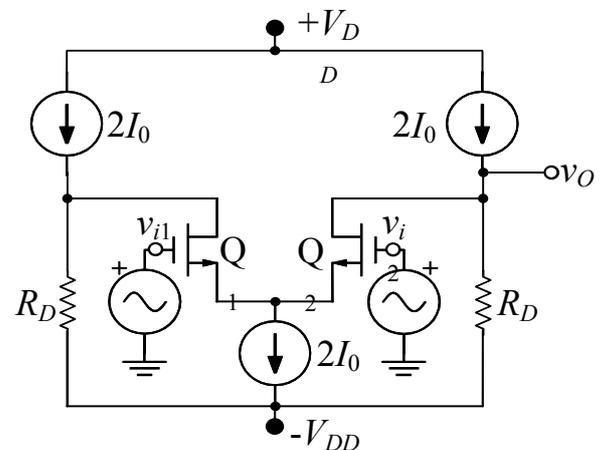


Figura 4

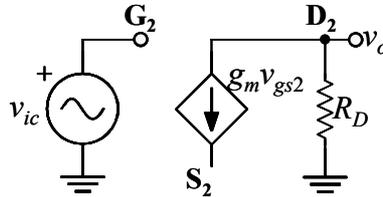
**SOLUCIÓN EJERCICIO 4:**

a)  $I_D = I_0 = 1 \text{ mA}$  para ambos transistores.  $V_O = -V_{DD} + (2I_0 - I_0)R_D = 2 \text{ V}$

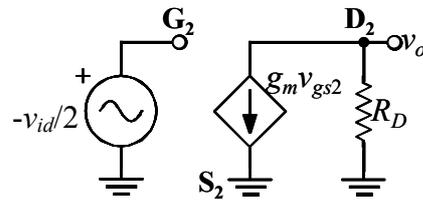
Ambos están saturados con  $V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{k}} = 2 \text{ V}$ ;  $V_{DS} = V_D - V_S = V_D - V_G + V_{GS} = 4 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 1 \text{ V}$

$g_m = 2\sqrt{kI_D} = 2 \text{ m}\Omega^{-1}$ ;  $r_o \rightarrow \infty$

b)  $g_m v_{gs2} = 0 \Rightarrow v_o = 0 \Rightarrow A_{Vc} = 0$



c)  $v_o = -g_m R_D v_{gs2} = -g_m R_D \frac{-v_{id}}{2} \Rightarrow A_{Vd} = \frac{g_m R_D}{2} = 7$



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serán tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS DE TEORÍA**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios. No se permite la consulta de escritos en hojas sueltas: apuntes, fotocopias de transparencias, etc., ni de colecciones (exclusivas) de problemas, estén o no editadas en forma de libro.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 20/09/01**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 26/09/01, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta las 17:30 h. del 25/09/01)**

**Ejercicio 1.** Se desea diseñar un circuito electrónico que realice la función  $v_o = \sqrt{v_I}$ . Para ello, se plantea el circuito de la figura 1.1, cuya curva de transferencia está formada por tres tramos lineales que aproximan dicha función, tal y como indica la figura 1.2.

Para que el circuito funcione correctamente, los diodos  $D_1$  y  $D_2$  han de estar en corte en el tramo 1 ( $v_I < 1$  V),  $D_1$  ha de conducir y  $D_2$  estar en corte en el tramo 2 ( $1 < v_I < 4$ ) y ambos diodos han de conducir en el tramo 3 ( $4 < v_I < 9$ ). Se pide:

- a) Valores de  $V_1$  y  $V_2$  que aseguran que los estados de los diodos son los arriba señalados. **(0,5 p)**
- b) Valor de  $R_1$  para que la función de transferencia del circuito sea la del tramo 2 para  $1 < v_I < 4$ . **(1 p)**
- c) Valor de  $R_2$  para que la función de transferencia del circuito sea la del tramo 3 para  $4 < v_I < 9$ . **(1 p)**

DATOS:  $R=1$  k $\Omega$ . Para ambos diodos,  $i=0$  para  $v < 0,7$  V y  $v=0,7$  V para  $i > 0$  A.

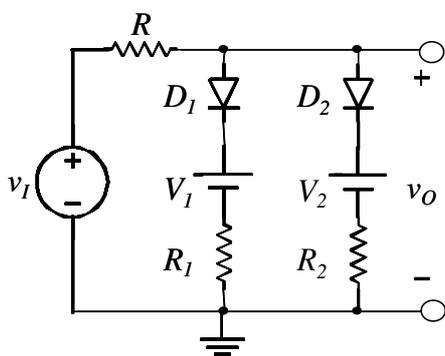


Figura 1.1

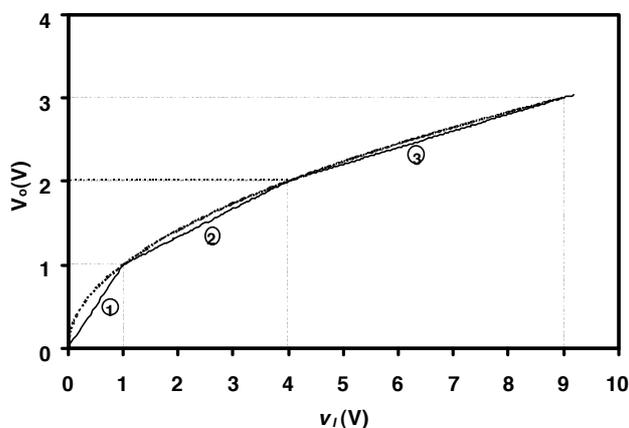


Figura 1.2

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

a) Los diodos entrarán en conducción cuando la tensión en sus bornas sea igual a la tensión de codo,  $v_O = V_{1,2} = V_\gamma$ .

$D_1$  entra en conducción para  $v_I = 1$ ,  $v_O = 1$ , luego  $V_1 = 0,3$  V

$D_2$  entra en conducción para  $v_I = 4$ ,  $v_O = 2$ , luego  $V_2 = 1,3$  V

b) En el tramo 2,  $D_1$  conduce y  $D_2$  está cortado. Para que  $v_O = 2$  V con  $v_I = 4$  V, la corriente por  $R$  ha de ser 2 mA. Esta corriente debe provocar una caída de tensión en  $R_1$  de 1 V, luego  $R_1 = 0,5$  k $\Omega$ .

c) En el tramo 3, ambos diodos conducen. Para que  $v_O = 3$  V con  $v_I = 9$  V, la corriente por  $R$  ha de ser 6 mA; De ellos 4 mA van por la rama de  $D_1$  y 2 mA atraviesan  $R_2$ , luego  $R_2 = 0,5$  k $\Omega$ .

**Ejercicio 2.** A la entrada del circuito de la Figura 2.1 se aplica un escalón de voltaje  $v_I$  entre 5 V y 2 V como indica la Figura 2.2, que también muestra la variación con el tiempo del voltaje de salida  $v_O$  en los terminales del condensador  $C$ .

a) En los instantes  $t_1$  y  $t_2$  señalados en la gráfica, el circuito está en estado estacionario. Rellene la tabla adjunta, indicando el estado del transistor (activa directa, activa inversa, corte o saturación) y justificando brevemente las respuestas **(1,0 p)**

Durante el intervalo de tiempo  $T$ , el voltaje  $v_O$  evoluciona linealmente desde 0 hasta, aproximadamente, 2,7 V.

b) Diga en qué estado se halla el transistor y cuánto vale la corriente de colector durante este intervalo de tiempo  $T$  **(1,0 p)**

c) Si  $T = 2,7$  ms, calcule la capacidad  $C$  **(0,5 p)**

(Si no calculó la corriente de colector en el apartado anterior, suponga  $i_C$  constante e igual a 2 mA.)

DATOS:  $R = 2,3$  k $\Omega$ ;  $V_{EE} = 5$  V.

Transistor:  $\beta = 500$ ; en activa directa y saturación  $v_{EB} = V_{EB(ON)} = 0,7$  V; en saturación  $v_{EC} = V_{EC(sat)} \cong 0$  V; el efecto de las capacidades parásitas es despreciable.

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

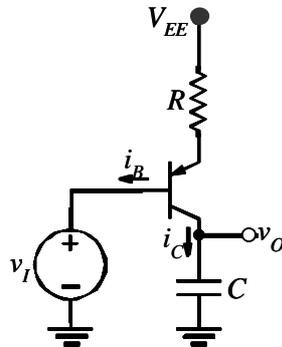


Figura 2.1

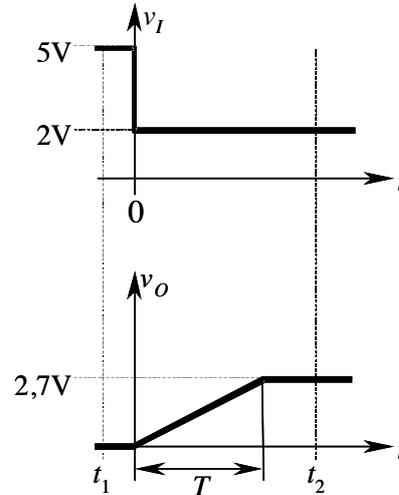


Figura 2.2

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**

	$I_B$ (mA)	$I_C$ (mA)	$V_{EC}$ (V)	ESTADO
$t_1$	0	0	5	CORTE
$t_2$	1	0	0	SATURACIÓN

a) La corriente de colector es la que atraviesa el condensador, que es nula en los estados estacionarios en que se encuentra el circuito en ambos casos.

En  $t = t_1$ ,  $0 = I_E R + V_{EB}$ , luego el transistor está cortado con  $I_B = 0$ . De la gráfica  $V_{EC} = V_{EE} - I_E R_E - v_O = V_{EE} = 5$  V  
 En  $t = t_2$ ,  $V_{EE} = I_E R + V_{EB} + 2$  V. El transistor conduce con  $I_E = (V_{EE} - 2 \text{ V} - V_{EB(ON)})/R = 1 \text{ mA} = I_B$ , ya que la corriente de colector es nula. Si la unión BE está en directa pero la corriente de colector es cero el transistor debe estar saturado  $V_{EC} = V_{EC(sat)} \cong 0$  V, lo que se confirma en la gráfica  $V_{EC} = V_{EE} - I_E R_E - v_O = 0$  V

b) En este tramo la polarización de la unión base – emisor es como antes e  $i_E = 1$  mA. Además,  $v_{EC} = V_{EE} - i_E R_E - v_O > 0 = V_{EC(sat)}$ , ya que de la gráfica  $v_O < 2,7$  V en este tramo, y el transistor trabaja en activa directa con  $i_B = i_E/(\beta+1) \cong 2 \mu\text{A}$ ;  $i_C = \beta i_B \cong i_E = 1$  mA

c) La corriente  $i_C$  carga el condensador de 0 a 2,7 V:

$$i_C = C \frac{dv_O}{dt}; v_O(T) - v_O(0) = \int_0^T \frac{i_C dt}{C} = \frac{i_C T}{C} \Rightarrow C = \frac{i_C T}{v_O(T) - v_O(0)} \cong 1 \mu\text{F}$$

(Con  $i_C = 2$  mA se obtendría  $C = 2 \mu\text{F}$ )

**Ejercicio 3.** En el circuito de la figura 3.1 considere que ambos transistores MOSFET de acumulación están trabajando en saturación y en régimen cuasi-estático.  $T1$  es de canal n y  $T2$  es de canal p.

- 1) Demuestre que  $i_o$  es proporcional a  $v_i$  y calcule la constante de proporcionalidad entre  $I_o$  y  $V_i$  (es decir, calcule  $i_o/v_i$ ) en función de  $V_{DD}$ ,  $K$  y  $V_T$ . (1 p.)
- 2) Si la salida se conecta a la entrada con la resistencia  $R$ , tal como se indica en la figura 3.2, calcule la relación  $R_{i=v_i/i_I}$  para gran señal. (1,5 p.)

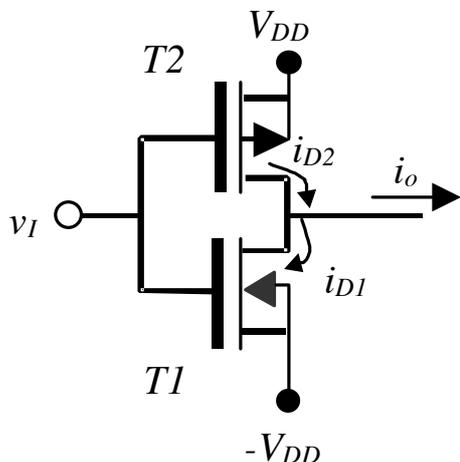


Fig. 3.1

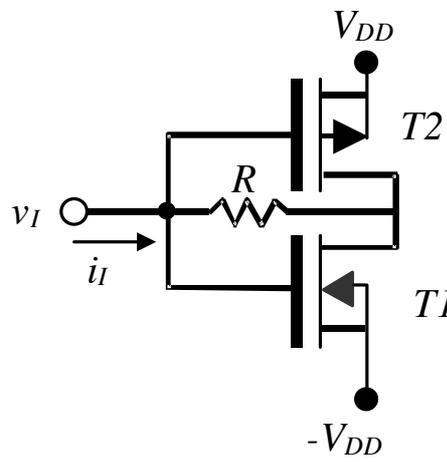


Fig. 3.2

DATOS:

$$K = 0,25 \text{ mA/V}^2 \quad |V_T| = 2 \text{ V} \quad V_{DD} = 12 \text{ V} \quad R = 30 \text{ } \Omega$$

$$I_{D1} = K(V_{GS1} - |V_T|)^2 \quad I_{D2} = K(V_{SG2} - |V_T|)^2$$

### SOLUCION EJERCICIO 3:

- 1) 
$$i_{D1} = K (v_i + V_{DD} - V_T)^2$$

$$i_{D2} = K (V_{DD} - v_i - V_T)^2$$

$$i_o = i_{D2} - i_{D1} = K (2V_{DD} - 2V_T) (-2v_i) = -4 K (v_{DD} - V_T) v_i$$

$$i_o/v_i = -4 K (V_{DD} - V_T) = -10 \text{ mA/V}$$
- 3) 
$$i_I = -i_o \Rightarrow v_i/i_I = 100 \text{ } \Omega$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 4.** La figura 4.1 muestra un circuito receptor de comunicaciones ópticas, que utiliza un amplificador operacional (AO) para amplificar la fotocorriente generada por un fotodiodo en inversa, que aparece representado como un generador de corriente  $I_G$ . El margen dinámico de la tensión de salida del AO está limitado por las tensiones de alimentación, como se indica en la figura 4.2. Considerando que las demás características del AO son ideales, se le pide:

- Expresar  $I_O$  en función de  $I_G$  cuando el AO opera en régimen lineal (el tramo vertical de la figura 4.2) (1,0 p.)
- Calcular el valor de  $I_G$  para el que el AO se satura con valor  $+V_{CC}$  (0,6 p.)
- Expresar  $I_O$  en función de  $I_G$  cuando el AO opera en régimen saturado con valor  $+V_{CC}$  (0,9 p.)

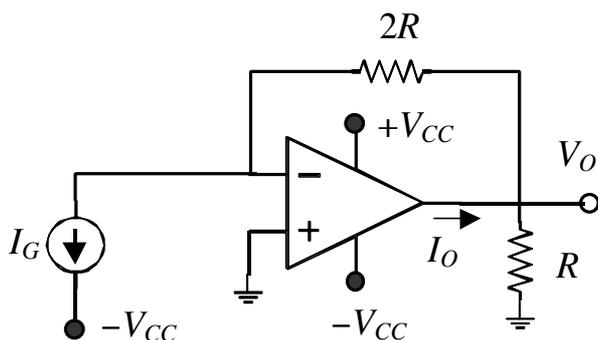


Figura 4.1

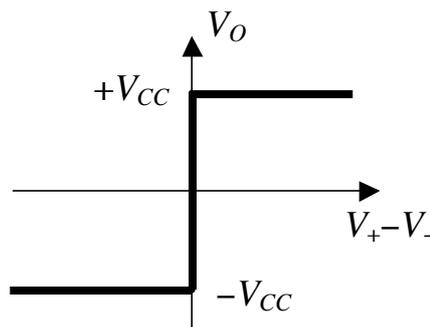


Figura 4.2

**DATOS:**  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$ . Del fotodiodo:  $|V_Z| = 15 \text{ V}$

### SOLUCION AL EJERCICIO 4:

- Como la corriente  $I_- = 0$ , se deduce que toda la corriente  $I_G$  circula por la resistencia  $2R$ . Además, en régimen lineal el AO impone el "cortocircuito virtual"  $V_- = V_+$  (véase la Fig. 4.2), y por tanto:

$$\left. \begin{array}{l} I_G = \frac{V_O}{2R} \\ I_O = I_G + \frac{V_O}{R} \end{array} \right\} \Rightarrow I_O = I_G + 2I_G = 3I_G$$

$$\text{b) } I_G = \frac{V_O}{2R} = \frac{V_{CC}}{2R} = 0,5 \text{ mA}$$

- De nuevo la corriente  $I_- = 0$ , por lo que igualmente toda la corriente  $I_G$  circula por la resistencia  $2R$ . Al estar saturado el AO no impone el cortocircuito virtual (véase la Fig. 4.2), sino que  $V_O = V_{CC}$ , y por tanto:

$$I_O = I_G + \frac{V_{CC}}{R} \Rightarrow I_O (\text{mA}) = I_G (\text{mA}) + 1$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios. Tampoco se permite la consulta de escritos en hojas sueltas: apuntes, fotocopias de transparencias, etc.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 06/02/02**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 11/02/02, a las 12:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes)**

**Ejercicio 1.** El fotodiodo del circuito de la figura 1.1 se puede modelar mediante el circuito equivalente de la figura 1.2. En oscuridad desde mucho tiempo atrás, recibe a partir de  $t = 0$  una iluminación tal que produce una corriente fotogenerada constante  $I_L = 10 \mu A$  como muestra la figura 1.3. Se pide:

- a) Calcular la tensión de salida en estado estacionario en oscuridad ( $t < 0$ ) y en iluminación ( $t \rightarrow \infty$ ) **(1,0 p.)**
- b) Expresar la variación de la tensión de salida en función del tiempo  $t$  para  $t > 0$  **(1,0 p.)**
- c) Calcular el tiempo de conmutación  $t_{LH}$  que se define como el que tarda la tensión de salida en alcanzar el 90 % de su valor final desde que se establece la iluminación **(0,5 p.)**

**DATOS:**  $V_{CC} = 5 V$ ;  $R = 100 k\Omega$ ;  $\ln(10) \cong 2,3$ ; el diodo en inversa ( $v_D \leq V_y = 0,7 V$ ) en régimen transitorio equivale a una capacidad de valor  $C_j = 10 pF$  y en estado estacionario a un circuito abierto, siempre en paralelo con la fuente de corriente proporcional a la iluminación.

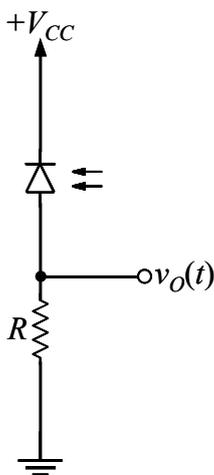


Figura 1.1

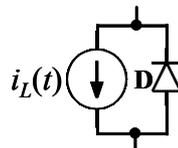


Figura 1.2

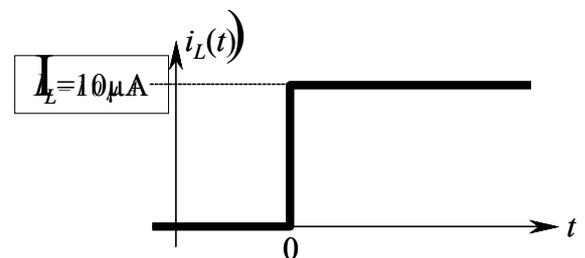


Figura 1.3

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

a) En estado estacionario sin iluminación el diodo está en inversa, luego la corriente por el diodo es cero:

$$V_O = 0 \text{ V } (t < 0)$$

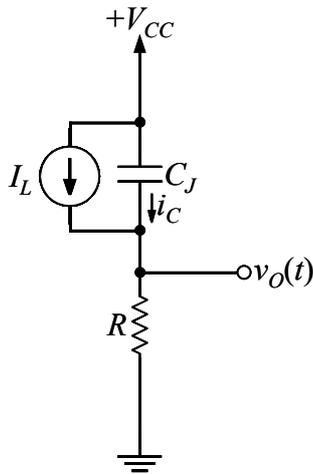
Se puede comprobar que  $v_D = -V_{CC} < V_\gamma$

Con iluminación el diodo sigue en inversa y la corriente es la del generador:

$$V_O = I_L R = 1 \text{ V } (t \rightarrow \infty)$$

Nuevamente, comprobamos que  $v_D = 1 - V_{CC} < V_\gamma$

b) En estado transitorio por el diodo circula, además de la corriente del generador, una componente que carga la capacidad  $C_J$ , según muestra la figura siguiente:



Con

$$i_c = C_J \frac{d(V_{CC} - v_o)}{dt} = -C_J \frac{dv_o}{dt}$$

$$v_o = (I_L + i_c)R = I_L R - RC_J \frac{dv_o}{dt}$$

Esta ecuación diferencial, con la condición inicial  $v_o(t) = 0$ , conduce a:

$$v_o(t) = I_L R \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC_J}} \right)$$

c) En  $t = t_{LH}$ :

$$v_o(t_{LH}) = 0,9 I_L R \Rightarrow e^{-\frac{t_{LH}}{RC_J}} = 0,1 \Rightarrow t_{LH} = RC_J \ln(10) \cong 2,3 \mu\text{s}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 2.** En los circuitos de las figuras 2.1 y 2.2 la estimación de la corriente  $i_L$  no puede realizarse mediante modelos aproximados lineales por tramos. Por ello se le pide que calcule, utilizando el modelo de Ebers-Moll:

- a) La expresión de  $i_L$  en función de  $v_G$  para el circuito de la figura 2.1 cuando el BJT opera en activa (0,6 p)
- b) El valor de  $v_G$  (con tres cifras significativas) para el que el transistor se satura (0,7 p)
- c) Ídem a) para el circuito de la figura 2.2 (1,2 p)

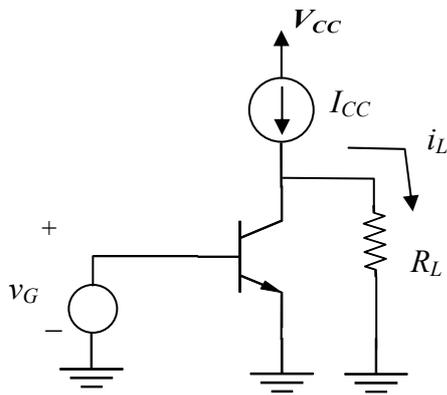


Figura 2.1

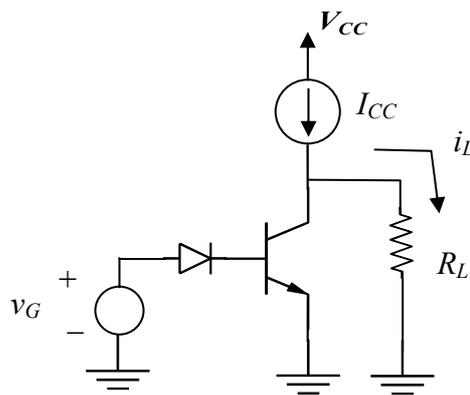


Figura 2.2

**DATOS:**  $I_{CC} = 100 \text{ mA}$ .

Para el diodo:  $i_D \approx I_S \exp(v_D/V_t)$

Para los BJT:  $\beta = 100$ ,  $V_t = 25 \text{ mV}$ ,  $I_0 = 1 \text{ pA}$ ,  $V_{CE,SAT} = 0 \text{ V}$ .

En activa:  $i_C \approx \beta i_B$ ,  $i_B \approx I_0 \exp(v_{BE}/V_t)$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**

a) Del nudo a la salida, teniendo en cuenta que  $v_G = v_{BE}$ :

$$i_L = I_{CC} - \beta i_B = I_{CC} - \beta I_0 \exp(v_G/V_t)$$

b) Para  $v_{CE} = V_{CE,sat} = 0$ ,  $i_L = v_{CE}/R_L = 0$ , por lo que, de la ecuación anterior:

$$v_G = V_t \ln\left(\frac{I_{CC}}{\beta I_0}\right) = 518 \text{ mV}$$

c) Como  $v_G = v_D + v_{BE}$ :

$$\left. \begin{aligned} i_B &= I_0 \exp\left(\frac{v_G - v_D}{V_t}\right) \\ i_B &= I_S \exp\left(\frac{v_D}{V_t}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_B = I_0 \frac{I_S}{i_B} \exp\left(\frac{v_G}{V_t}\right) \Rightarrow i_B = \sqrt{I_0 I_S} \exp\left(\frac{v_G}{2V_t}\right)$$

$$i_L = I_{CC} - \beta i_B = I_{CC} - \beta \sqrt{I_0 I_S} \exp\left(\frac{v_G}{2V_t}\right)$$

**Ejercicio 3.** El componente de dos terminales de la figura 3.1 está formado por 2 MOST de canal n de acumulación. La característica de este componente es igual a la que tiene el componente de la figura 3.2 si sus parámetros son ajustados adecuadamente.

- a) Calcular la expresión de  $k_3$  y  $V_{T3}$  en función de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $V_{T1}$  y  $V_{T2}$  para que las características  $V-I$  de los componentes de las figuras 3.1 y 3.2 sean idénticas (2 p.)
- b) ¿Cuánto vale  $I$  si  $V = V_{T1} + V_{T2}$ ? (0,5 p.)

**DATOS:** En saturación  $i_D = k_i (V_{GS} - V_{Ti})^2$ ,  $V_{Ti} > 0$ ,  $i = 1, 2, 3$

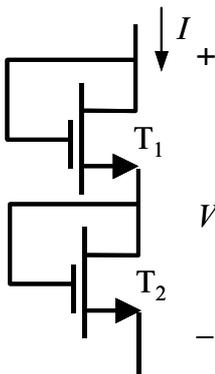


Figura 3.1

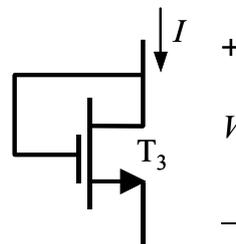


Figura 3.2

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

En los 2 MOST de la figura 3.1  $V_{DS} = V_{GS} \geq V_{Dsat} = V_{GS} - V_T \Rightarrow$  están en saturación si no están cortadas.

Sea  $V_1 = V_{DS1}$  y  $V_2 = V_{DS2}$

a)

$$\left. \begin{aligned} I &= k_1 (V_1 - V_{T1})^2 \\ I &= k_2 (V_2 - V_{T2})^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} V_1 - V_{T1} &= \sqrt{\frac{I}{k_1}} \\ V_2 - V_{T2} &= \sqrt{\frac{I}{k_2}} \end{aligned} \right\} \text{Signo positivo de las raíces porque } V_{GS} \geq V_T$$

$$V_1 + V_2 - (V_{T1} + V_{T2}) = \sqrt{I} \left( \frac{1}{\sqrt{k_1}} + \frac{1}{\sqrt{k_2}} \right)$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

$$I = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{k_1}} + \frac{1}{\sqrt{k_2}}\right)^2} (V - (V_{T1} + V_{T2}))^2$$

$$k_3 = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{k_1}} + \frac{1}{\sqrt{k_2}}\right)^2} \quad V_{T3} = V_{T1} + V_{T2}$$

b)

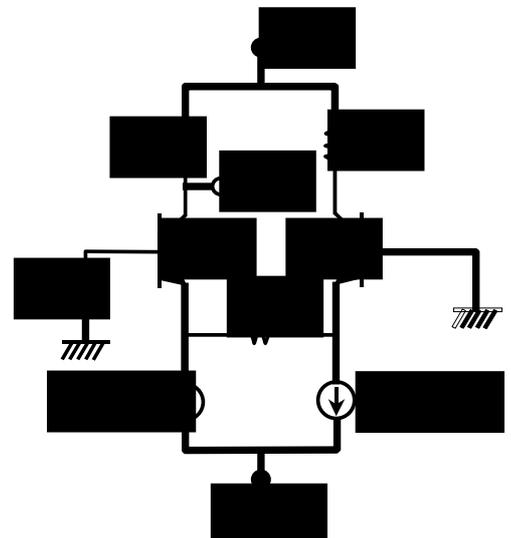
$$V \leq V_{T1} + V_{T2} \rightarrow \text{ambos MOST en corte}$$

$$I = 0$$

**Ejercicio 4.** Si en el amplificador de la figura los dos transistores  $T_1$  y  $T_2$  son idénticos:

- Calcule  $h_{ie}=r_\pi$  (0,5 p.)
- Dibuje el circuito de pequeña señal en modo común y en modo diferencial (1 p.)
- Calcule  $v_o/v_i$  (1 p.)

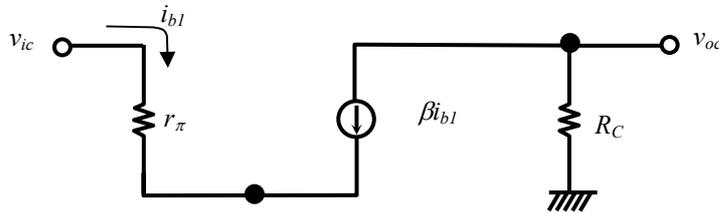
**DATOS:**  $\beta=100$ ,  $V_t=0,025$  V,  
 $R_C=1$  k $\Omega$   
 $R=0,2$  k $\Omega$   
 $V_A$  (tensión Early)  $\rightarrow \infty$



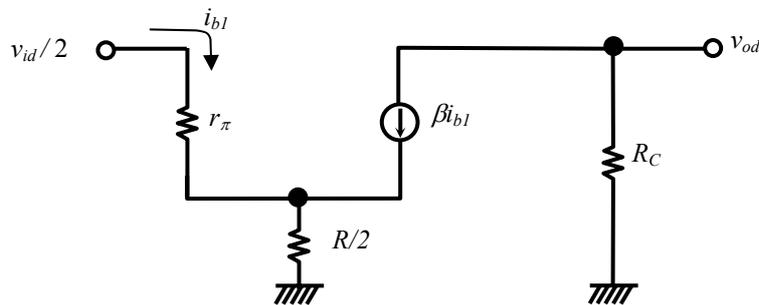
**SOLUCION AL EJERCICIO 4:**

a) Las corrientes de colector de T1 y T2 son iguales por simetría:  $I_{C1}=I_{C2}=2,5 \text{ mA}$   
 Luego  $r_{\pi}=h_{ie}=\beta V_T/I_C=1 \text{ k}\Omega$

b) El circuito es simétrico para cada transistor. En modo común no hay corriente por R y  $v_{ic}=v_i/2$



En modo diferencial el punto medio de la resistencia R se puede llevar a tierra por simetría y  $v_{id}=v_i$



c)  $v_o=v_{oc}+v_{od}$   
 $v_{oc}=0$  ya que al no circular corriente por R obliga a que  $i_{b1}=\beta i_{b1}$  por lo que  $i_{b1}=0$   
 $v_{id}=R(\beta+1)i_{b1}+2r_{\pi}i_{b1}$  y  $v_{od}=-R_C\beta i_{b1}$ , con lo que  $\frac{v_{od}}{v_{id}} = -\frac{R_C\beta}{R(\beta+1)+2r_{\pi}}$

Finalmente,  $\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_C\beta}{R(\beta+1)+2r_{\pi}} = -\frac{100}{22,2} = -4,44$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Se permite el uso de **CALCULADORA** y, para consulta, **LIBROS** o cualquier documentación **ENCUADERNADA** (apuntes, fotocopias de transparencias, colecciones de problemas, etc.). **NO** se permite el uso compartido de medios.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 08/07/02**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 12/07/02, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** El diodo Zener del circuito de la figura 1.1 tiene una característica I-V cuya aproximación lineal por tramos se muestra en la figura 1.2. En ella se indica que cuando el Zener desea utilizarse como regulador de tensión en inversa, su corriente ha de estar entre  $I_{zmin}$  e  $I_{zmax}$ . Calcule:

- Los valores máximo y mínimo de R para que el Zener regule tensión si  $V_{CC}=12\text{ V}$  (**1 p.**)  
Se fija ahora el valor de  $R=0,3\text{ k}\Omega$  y se cambia la tensión de alimentación a  $V_{CC}=7\text{ V}$ . Calcule:
- La corriente que circula por el diodo,  $I_D$ . (**0,7 p.**)
- La tensión que cae en el diodo Zener,  $V_D$ . (**0,8 p.**)

DATOS:  $I_{CC} = 10\text{ mA}$ . En la figura 1.2 se considera tensión positiva la que cae de ánodo (+) a cátodo (-) y corriente positiva la que va de ánodo a cátodo (véase la figura 1.3).

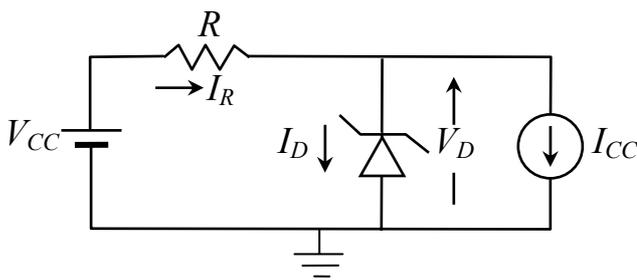


Figura 1.1

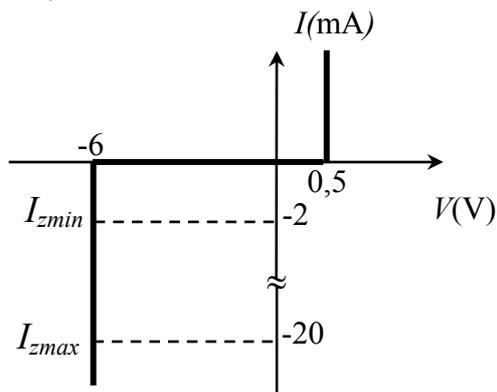


Figura 1.2

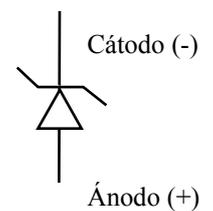


Figura 1.3

**SOLUCIÓN**

- Quando el Zener regula tensión,  $V_D=6\text{ V}$  e

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_D}{R} = I_D + I_{CC}$$

por tanto, para la  $I_{zmax}$ :

$$R_{min} = \frac{V_{CC} - V_D}{I_{zmax} + I_{CC}} = \frac{12 - 6}{20 + 10} = 0,2\text{ k}\Omega$$

y para la  $I_{zmin}$

$$R_{max} = \frac{V_{CC} - V_D}{I_{zmin} + I_{CC}} = \frac{12 - 6}{2 + 10} = 0,5 \text{ k}\Omega$$

Por tanto,  $0,5 > R > 0,2$  (k $\Omega$ )

b) Se supone que el Zener regula tensión y  $V_D = 6$  V. Por tanto,

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_D}{R} = \frac{7 - 6}{0,3} = 3,33 \text{ mA}$$

que es menor que  $I_{CC}$ . En consecuencia, el Zener no regula tensión y  $V_D < 6$  V, lo que significa que está en inversa sin conducir, por lo que  $I_D = 0$ .

c) Si el Zener no conduce se cumple que  $I_R = I_{CC} = 10$  mA y

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_D}{R} \Rightarrow V_D = V_{CC} - I_R \cdot R = 7 - 10 \cdot 0,3 = 4 \text{ V}$$

## Ejercicio 2.

- Calcule la corriente  $I_A$  suponiendo que  $T_1$  está en saturación,  $T_2$  en activa y que  $V_A = 2$  V (1 p.)
- Si  $V_A \leq V_T$ , ¿cuál es el estado de  $T_2$ ? (0,5 p.)
- ¿Existe algún valor de  $V_A$  que hace que  $T_2$  entre en saturación, y en ese caso cuál es? (Suponga  $T_1$  en la región lineal, en la que se comporta como una resistencia controlada por la tensión puerta-fuente) (1 p.)

DATOS:

$$T_1: k = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \quad V_T = 1 \text{ V}; \text{ en saturación } I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

$$T_2: \beta = 100 \quad V_{EB}(\text{ON}) = V_{\gamma E} = 0,7 \text{ V} \quad V_{ECsat} = 0,2 \text{ V}$$

$$V_{EE} = 10 \text{ V} \quad R = 10 \Omega$$

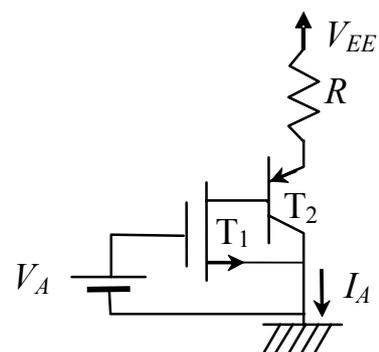
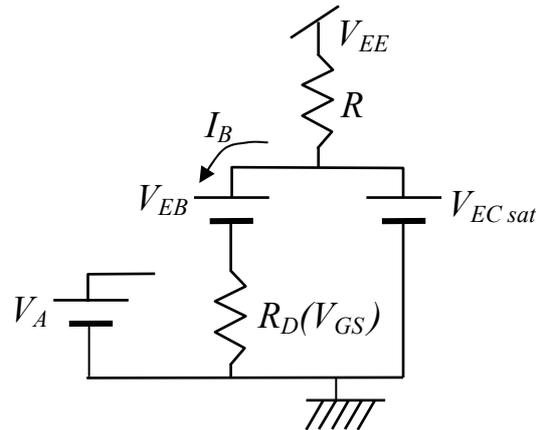


Figura 2

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN:**

- a)  $I_A = (1 + \beta)k(V_{GS} - V_T)^2 = 101 \times 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \times (1\text{V})^2 = 101\text{mA}$
- b)  $T_1$  en corte  $\Rightarrow V_{GS} \leq V_T \Rightarrow I_D = 0 \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow T_2$  en corte
- c) Si  $T_2$  en saturación, y  $T_1$  en zona lineal, el circuito se puede representar como :



Con  $V_{ECsat} = 0,2\text{V}$  y  $V_{EB} = 0,7\text{V}$  la corriente  $I_B = \frac{V_{ECsat} - V_{EB}}{R_D(V_{GS})} < 0 \Rightarrow$  no es compatible con la hipótesis de  $T_2$  en sat  $\Rightarrow$  no existe ningún valor  $V_A$  para el que  $T_2$  está en saturación.

**Ejercicio 3.** Para el amplificador seguidor de emisor de la figura:

- a) Calcule el punto de polarización ( $V_{CE}, I_C$ ), comprobando que el transistor está en activa. **(0,5 p.)**
- b) Dibuje el circuito equivalente para la pequeña señal. Considere que en pequeña señal la fuente de corriente se comporta como una resistencia de valor  $R_{eq}=100\text{ k}\Omega$ . **(0,5 p.)**
- c) Calcule la ganancia de tensión de pequeña señal  $v_o/v_i$  **(0,5 p.)**
- d) Halle el margen dinámico a la salida, que viene dado por la máxima amplitud de la señal sinusoidal  $v_o$  a partir de la cual el transistor deja de funcionar en activa. **(1 p.)**

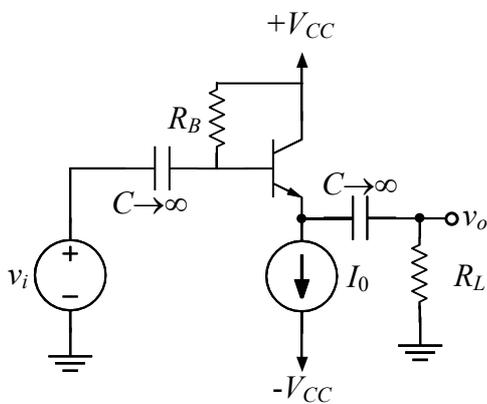


Figura 3

DATOS:

$$V_{CC}=5\text{ V}, R_B=462\text{ k}\Omega$$

$$I_0=1\text{ mA}, R_L=1\text{ k}\Omega$$

$$\beta=200, V_{BE}=V_{\gamma E}=0,7\text{ V}, V_{CESAT}=0,2\text{ V},$$

$$V_T=kT/e=0,025\text{ V}$$

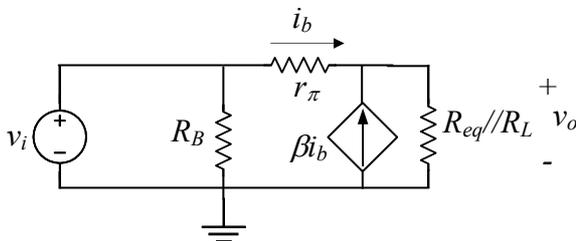
**SOLUCIÓN**

a) En polarización, las capacidades se comportan como circuitos abiertos, luego  $I_E = I_0 = 1\text{ mA} \approx I_C$ .

$$V_{CE} = R_B \frac{I_0}{\beta+1} + V_{\gamma E} \approx 3\text{ V}$$

El transistor está en activa pues  $I_C > 0, V_{CE} > V_{CESAT}$

b) El circuito equivalente de pequeña señal es



con  $r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \beta \frac{V_T}{I_C} = 5\text{ k}\Omega$ . Resolviendo,

$$v_o = (R_{eq} // R_L)(\beta+1)i_b \quad \left. \begin{array}{l} v_o \\ v_i - v_o = r_\pi i_b \end{array} \right\} v_o = \frac{(R_{eq} // R_L)(\beta+1)}{(R_{eq} // R_L)(\beta+1) + r_\pi} \approx \frac{R_L \beta}{R_L \beta + r_\pi} \approx 0.976$$

c) El margen dinámico vendrá dado por lo que antes ocurra, que el transistor se corte o se sature.

Para que se corte,  $I_C + i_c = 0 \Rightarrow I_C + \frac{v_o \beta}{(R_{eq} // R_L)(\beta+1)} = 0 \Rightarrow v_o \approx -I_C R_L = -1\text{ V}$

Para que se sature,  $V_{CE} + v_{ce} = V_{CESAT} \Rightarrow V_{CE} - v_o = V_{CESAT} \Rightarrow v_o = 2,8\text{ V}$

El margen dinámico es la menor de las amplitudes (en valor absoluto)  $\Rightarrow MD_{out}=1\text{ V}$

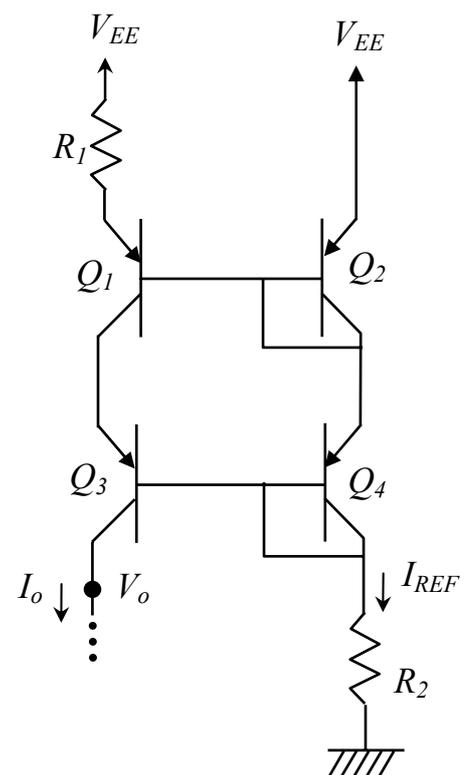
<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 4.** El circuito de la figura 4 muestra una fuente de corriente compuesta por cuatro transistores pnp. Sabiendo que todos los transistores operan en activa, calcule:

- La corriente  $I_{REF}$  suponiendo  $V_{EB2} \cong V_{EB4} \cong 0,6V$  **(0,7 p.)**
- El valor de la resistencia  $R_1$  para que la corriente  $I_0$  sea 5 veces menor que  $I_{REF}$ . Desprecie las corrientes de base respecto a las demás del circuito. **(1 p.)**
- Las tensiones  $V_{EB1}$ ,  $V_{EB2}$ ,  $V_{EB3}$  y  $V_{EB4}$  con tres cifras significativas, considerando que para todos los transistores

$$I_C \cong I_S \exp \frac{V_{EB}}{V_T}. \quad \textbf{(0,8 p.)}$$

DATOS:  $R_2 = 4,4 \text{ k}\Omega$   $V_T = 0,025 \text{ V}$   
 $V_{EE} = 10 \text{ V}$   $I_S = 7,5 \cdot 10^{-14} \text{ A}$



**SOLUCIÓN:**

$$\text{a) } I_{REF} = \frac{V_{EE} - V_{EB2} - V_{EB4}}{R_2} = \frac{10 - 0,6 - 0,6}{4,7k} = 2 \text{ mA}$$

b)

$$\left. \begin{array}{l} V_{EB2} = V_{EB1} + I_0 R_1 \\ V_{EB2} = V_T \ln \frac{I_{REF}}{I_S} \\ V_{EB1} = V_T \ln \frac{I_0}{I_S} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_0 R_1 = V_T \ln \frac{I_{REF}}{I_0} \\ R_1 = \frac{V_T}{I_0} \ln \frac{I_{REF}}{I_0} = 100,6 \Omega \end{array}$$

$$\text{c) } v_{EB1} = v_{EB3} = V_T \ln \frac{I_0}{I_S} = 0,560 \text{ V}$$

$$v_{EB2} = v_{EB4} = V_T \ln \frac{I_{REF}}{I_S} = 0,600 \text{ V}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Se permite el uso de **CALCULADORA** y, para consulta, **LIBROS** o cualquier documentación **ENCUADERNADA** (apuntes, fotocopias de transparencias, colecciones de problemas, etc.). **NO** se permite el uso compartido de medios.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 30/09/02**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 03/10/02, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** El circuito de la figura 1.1 es un circuito regulador de tensión. Los cinco diodos son idénticos y se pueden modelar con la ecuación de Shockley.

- a) Calcule el valor de  $R$  para que la tensión a la salida  $V_o$  sea de 3 V cuando  $V_I=5$  V. **(0,9 p)**

Se quiere mejorar el circuito regulador sustituyendo los diodos por un diodo especial para este tipo de aplicaciones, un diodo zéner que modelamos con el modelo lineal por tramos de la figura 1.2.

- b) Dibuje el nuevo circuito, colocando adecuadamente el zéner, y compruebe que la tensión  $V_o=3$  V para  $V_I=5$  V. **(0,8p)**
- c) Calcule para este circuito la variación de la tensión de salida respecto a su valor nominal cuando la tensión de entrada  $V_I$  aumenta +0,5V sobre el valor nominal de 5V. **(0,8 p)**

NOTA: Dé los valores de resistencia con precisión de ohmio y los de tensión con precisión de mV cuando sea necesario.

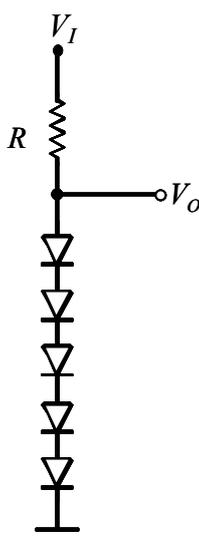


Figura 1.1

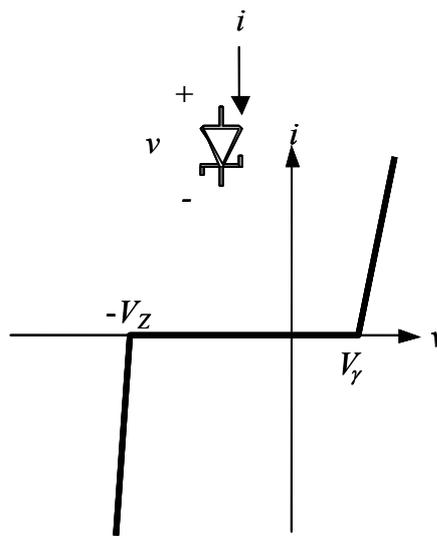


Figura 1.2

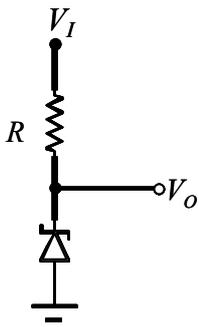
DATOS:

Modelo de Shockley  
 $I_0=10^{-12}$  A;  $V_f=0,025$  V  
 $I = I_0 (\exp V/V_f - 1)$   
 Diodo zéner  
 $V_f=0,7$  V;  $r_D=2$   $\Omega$   
 $V_Z=2,98$  V;  $r_Z=0,75$   $\Omega$

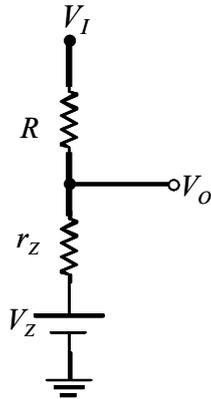
**SOLUCIÓN**

a) En cada diodo cae  $V_D = \frac{V_0}{5}$ , luego  $\frac{V_I - V_0}{R} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_0}{5V_T}\right) - 1 \right] \Rightarrow R = 75 \Omega$

b)



Y el circuito equivalente:



Luego

$$V_0 = r_Z \frac{V_I - V_Z}{R + r_Z} + V_Z = 3V$$

c)  $V_0' = r_Z \frac{V_I' - V_Z}{R + r_Z} + V_Z = 3,005 V \Rightarrow \Delta V_0 = 0,005 V \quad (0,16\%)$

**Ejercicio 2.** El circuito de la figura 2.2 se quiere usar para cargar el condensador C bajo el control de la señal  $v_I$  de la figura 2.1.

Se parte del instante  $t = 0$  en el que se supone que el condensador está completamente descargado, es decir  $v_O = 0$ . Suponiendo que el TRT nunca llega a saturarse:

- Dibuje el circuito equivalente de gran señal en  $t > 0$  para este circuito, razonando sobre el estado del transistor. **(0,6 p.)**
- Calcule las corrientes de base, colector y emisor para el instante  $t = 0^+$  y  $t \rightarrow \infty$ . **(0,6 p.)**
- Obtenga la ecuación diferencial de  $v_O$  respecto a  $t$  a partir de  $t = 0^+$  **(0,7 p.)**
- Obtenga  $v_O(t)$  a partir de  $t = 0^+$  resolviendo la ecuación diferencial del apartado c). **(0,6 p.)**

DATOS:  $R_g = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 100$ ,  $V_{CC} = 10 \text{ V}$   
 Diodo base emisor:  $V_{BE} \approx 0,6 \text{ V}$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$

El transistor responde inmediatamente a la señal de entrada, es decir, las capacidades del transistor son nulas.

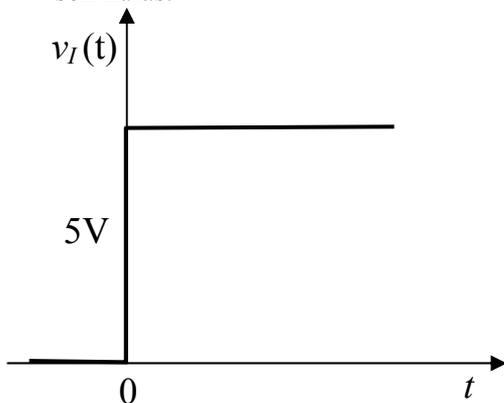


Figura 2.1

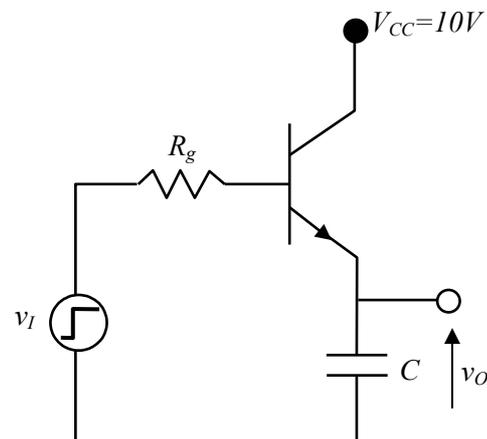
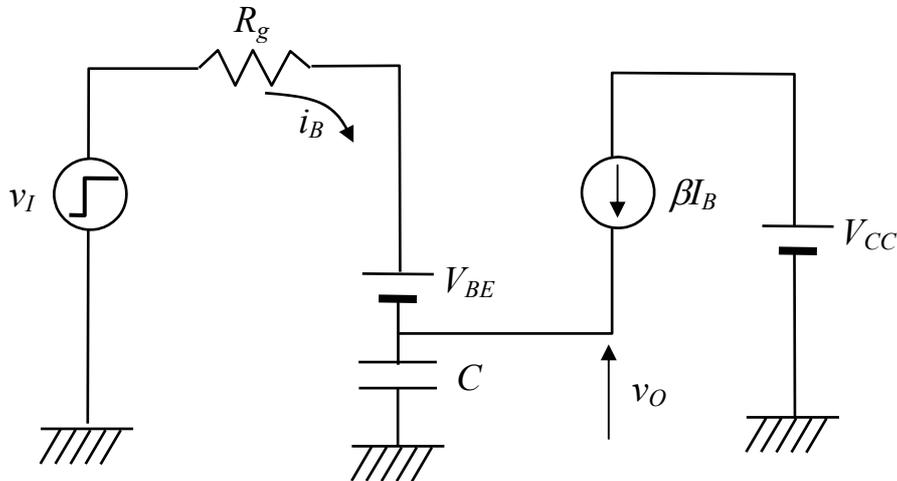


Figura 2.2

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN:**

a)



b)

$$i_B = \frac{v_I - V_{BE} - v_o}{R_g} \cong \frac{v_I - V_{BE} - v_o}{R_g} = \frac{5 - 0,6 - v_o}{50k} \begin{cases} i_{B \max} = 0,088 \text{ mA} \\ i_{B \min} = 0 \end{cases}$$

$$i_C = \beta i_B \begin{cases} i_{C \max} = 8,8 \text{ mA} \\ i_{B \min} = 0 \end{cases}$$

$$i_E = (\beta + 1) i_B \begin{cases} i_{C \max} = 8,89 \text{ mA} \\ i_{B \min} = 0 \end{cases}$$

c)

$$v_o(t > 0^+) = \frac{1}{C} \int_0^t i_E dt = \frac{\beta + 1}{CR_g} \int (v_I - V_{BE} - v_o) dt$$

Derivando

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{\beta + 1}{CR_g} (v_I - V_{BE} - v_o)$$

$$\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{\frac{CR_g}{\beta + 1}} = \frac{\beta + 1}{CR_g} (v_I - V_{BE})$$

$$\boxed{\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{\tau} = \frac{1}{\tau} (v_I - V_{BE})} \quad \tau = \frac{CR_g}{\beta + 1} = \frac{10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^4}{101} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 500 \mu\text{s}$$

d)

Solución general de la ecuación homogénea

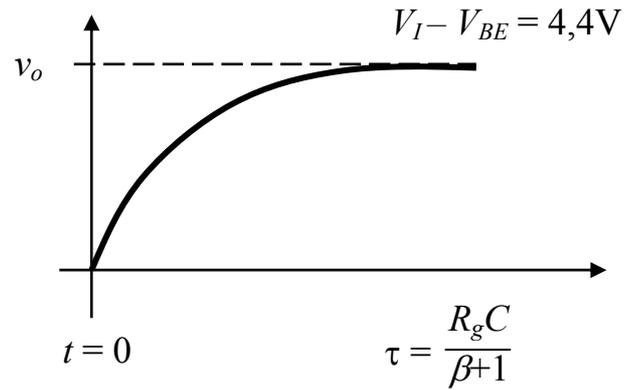
$$v_o(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Solución particular  $v_o(t) = v_I - V_{BE}$

Condición inicial

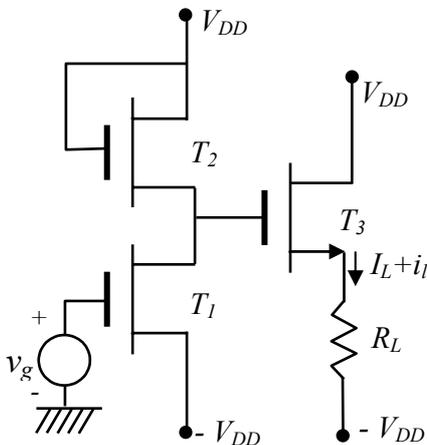
$$v_o(0) = 0 = A + (v_I - V_{BE}) \Rightarrow A = (v_I - V_{BE})$$

$$v_o(t) = (v_I - V_{BE}) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$



### Ejercicio 3.

La figura 3.1 muestra un circuito amplificador realizado con tres transistores MOSFET de acumulación de canal n que operan en saturación. El transistor  $T_2$ , debido al cortocircuito que presenta entre puerta y drenador, actúa como un componente de dos terminales. En pequeña señal, este componente de dos terminales se comporta como una resistencia equivalente  $R_{EQUIV}$ . Se le pide calcular:



- a) El valor de  $R_L$  para que  $I_L = 10 \text{ mA}$  (1 p.)
- b) El valor de  $R_{EQUIV}$  (0,5 p.)
- c) El valor de la transconductancia  $i_l / v_g$  de pequeña señal y frecuencias medias del circuito (1 p.)

DATOS:  $V_{DD} = 5 \text{ V}$

Para los transistores MOSFET: en saturación  $i_D = \kappa (v_{GS} - V_T)^2$

$V_T = 2 \text{ V}$  para los tres transistores.

$\kappa_1 = \kappa_2 = 0,1 \text{ mA/V}^2$ ,  $\kappa_3 = 10 \text{ mA/V}^2$

Figura 3.1

### SOLUCIÓN:

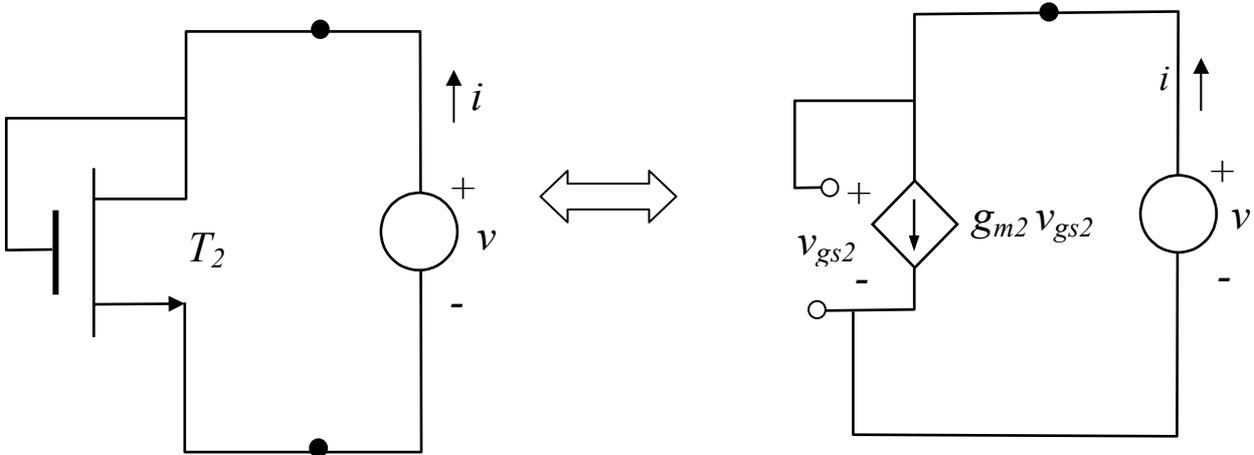
$$a) V_{GS1} = 0 - (-V_{DD}) = V_{DD} = 5 \text{ V} \Rightarrow I_{D1} = \kappa_1 (V_{DD} - V_T)^2 = 0,9 \text{ mA}$$

$$\text{Como } I_{D2} = I_{D1}, V_{GS2} = V_T + \sqrt{\frac{I_{D2}}{\kappa_2}} = 0 - (-V_{DD}) = V_{DD} = 5 \text{ V} \Rightarrow V_{G3} = V_{DD} - V_{GS2} = 0$$

$$\text{Así } V_{GS3} = V_T + \sqrt{\frac{I_{D3}}{\kappa_3}} = 0 - (-V_{DD} + I_{D3} R_L) \Rightarrow R_L = \frac{V_{DD} - V_T - \sqrt{\frac{I_{D3}}{\kappa_3}}}{I_{D3}} = 200 \Omega$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

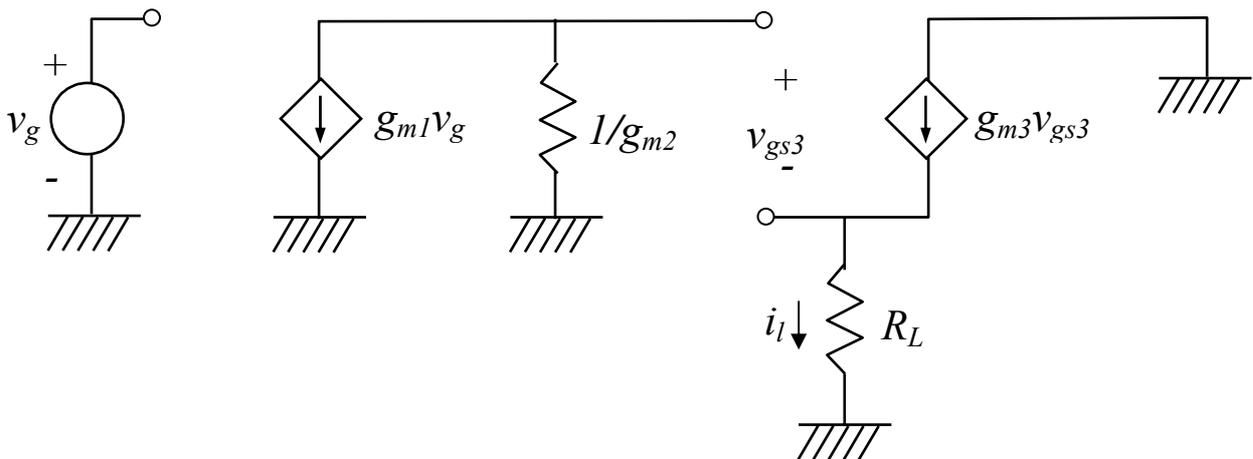
b)



$$R_{EQUIV} = \frac{v}{i} = \frac{v}{g_{m2}v} = \frac{1}{g_{m2}}$$

Como  $g_{m2} = 2\kappa_2(V_{GS2} - V_T) = 0,6 \text{ mS} \Rightarrow R_{EQUIV} = 1,67 \text{ k}\Omega$

c)



$$\left. \begin{aligned} i_l &= g_{m3}v_{gs3} \\ v_{gs3} &= v_{g3} - v_{s3} = (-g_{m1}v_g)(1/g_{m2}) - i_l R_L \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{i_l}{v_g} = \frac{-g_{m1}/g_{m2}}{R_L + 1/g_{m3}} = -4 \text{ mS}$$

donde se ha empleado que  $g_{m1} = g_{m2} = 0,6 \text{ mS}$  y  $g_{m3} = 2\kappa_3(V_{GS3} - V_T) = 20 \text{ mS}$ :

**Ejercicio 4** El amplificador operacional de la figura 4.1 es ideal excepto en su tensión de *offset*, que es distinta de cero, y en su ganancia, que no es infinita. Como consecuencia, el voltaje de salida del AO en régimen lineal (no saturado) se puede modelar como  $v_o = A (v_+ - v_-) + V_{off}$

- a) Calcular el valor de  $v_o$  cuando  $v_I = 0$  (1,2 p.)
- b) Calcular el valor de  $v_I$  para el que  $v_o = 0$ . (1,3 p.)

DATOS:  $A = 10^5$ ,  $V_{off} = 10$  V,  $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_1 = 1$  k $\Omega$

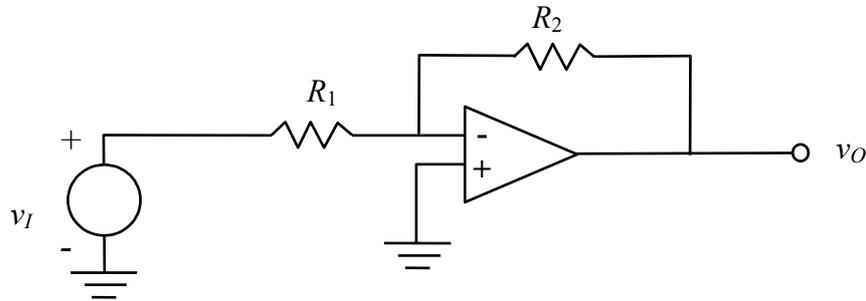
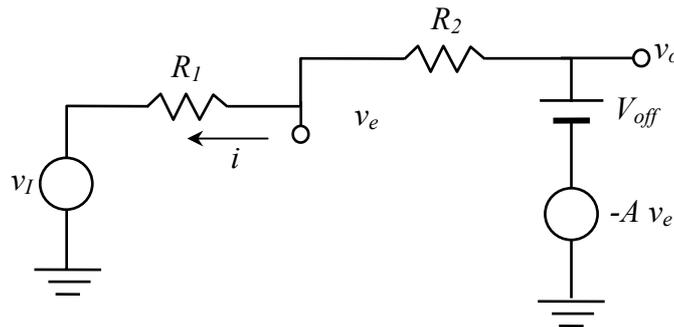


Figura 4.1

**SOLUCIÓN:**



$$\left. \begin{aligned} v_e &= v_I + R_1 \frac{v_o - v_I}{R_1 + R_2} \\ v_o &= V_{off} - A v_e \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_o \left( 1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = V_{off} - A \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_I$$

$$v_o = \frac{V_{off} - A \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_I}{1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

a) Así  $v_I = 0$   $v_o = \frac{V_{off}}{1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{10 \text{ V}}{1 + \frac{10^5}{11}} = 1,1 \text{ mV}$

b) Así  $v_o = 0 \Rightarrow v_I = \frac{R_1 + R_2}{AR_2} V_{off} = \frac{11}{10^5 \cdot 10} 10 \text{ V} = 0,11 \text{ mV}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

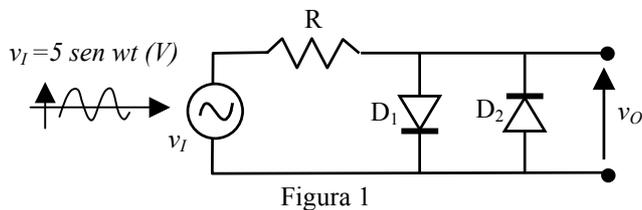
**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de **enunciados** como para **borradores**, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de **enunciados** y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de **enunciados** es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para **borradores** **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Puede utilizar su **CALCULADORA** y, para consulta, sus **LIBROS**. Pero **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios. Tampoco se permite la consulta de escritos en hojas sueltas: apuntes, fotocopias de transparencias, etc.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 30/01/03**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 4/02/03, a las 12:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes)**

**Ejercicio 1.** Polarizando en directa un diodo de unión pn en el laboratorio, se han obtenido dos puntos significativos de su curva IV:  $A$  (10 mA, 600 mV),  $B$  (20 mA, 700 mV). Se ha verificado también que en inversa  $V_Z > 20$  V y  $r_Z \rightarrow \infty$ . Se pide:

- a) Encontrar los parámetros  $V_\gamma$  y  $R_f$  (tensión de codo y resistencia en directa) del modelo lineal por tramos que se ajusta a los dos puntos medidos (**0,7 p.**)

Con dos diodos iguales que el anterior se construye un circuito limitador de  $\pm V_\gamma$  como el de la figura 1.



- b) Escribir las ecuaciones de la función de transferencia  $v_O = f(v_I)$  de este circuito y representarlas gráficamente (**1 p.**)

- c) Dibujar la forma de la tensión de salida en función del tiempo, calculando los valores de amplitud (**0,8 p.**)

DATOS:  $v_I = 5 \text{ sen } \omega t$  (Volts);  $kT/e = 25 \times 10^{-3}$  V;  $R = 1 \text{ k}\Omega$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

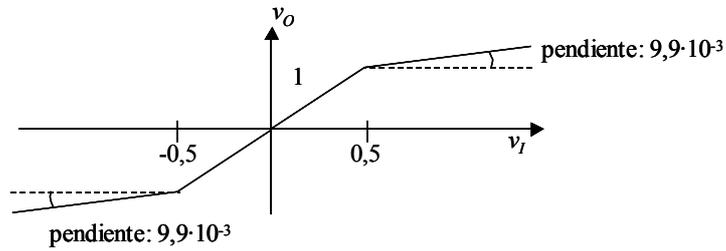
$$\text{a) } V = V_\gamma + R_f I \begin{cases} V_A - V_B = R_f (I_A - I_B) \\ R_f = \frac{(600 - 700) \text{ mV}}{(10 - 20) \text{ mA}} = 10 \Omega \end{cases}$$

$$V_\gamma = V_A - I_A R_f = 600 - 10 \cdot 10 = 500 \text{ mV}$$

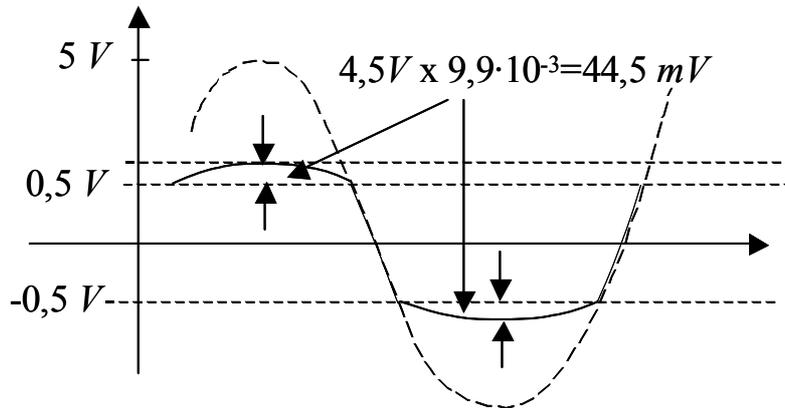
b) Para  $-0,5V < v_i < 0,5V$  ningún diodo conduce y  $v_o = v_i$ .

Para  $v_i > 0,5V$  conduce el diodo  $D_1$ . Para  $v_i < -0,5V$  conduce  $D_2$ . En ambos casos tenemos una recta de pendiente

$$\frac{R_f}{R + R_f} = \frac{10}{1010} = 9,9 \times 10^{-3}, \text{ con ordenada en el origen } \pm \frac{V_\gamma}{1 + R_f/R} = \pm 0,495 \text{ V}$$



c)



<b>APELLIDOS</b>		
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>

**Ejercicio 2.** Se pretende comparar diferentes modelos del BJT en activa (ver nota) en el cálculo del punto de trabajo del circuito de la figura 2. Sin necesidad de comprobar que el BJT opera en activa, se le pide:

- Calcular  $V_{BE}$ ,  $I_B$ ,  $V_{CE}$  e  $I_C$  utilizando el modelo lineal por tramos básico (0.5 p.)
- Idem a) utilizando el modelo lineal por tramos avanzado (1 p.)
- Utilizando el modelo de Ebers-Moll aproximado para activa, no es posible alcanzar una solución por resolución analítica. Deducir la ecuación con  $I_C$  como única incógnita que se obtiene con este modelo (1 p.)

DATOS:  $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{BB} = 3 \text{ V}$ ,  $R_B = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 700 \Omega$ .

De los modelos del BJT :

$$V_{\gamma E} = 0,70 \text{ V}, \beta = 100, r_{\pi} = 2 \text{ k}\Omega, V_A = 80 \text{ V}, I_0 = 10^{-15} \text{ A}, V_t = 25 \text{ mV}$$

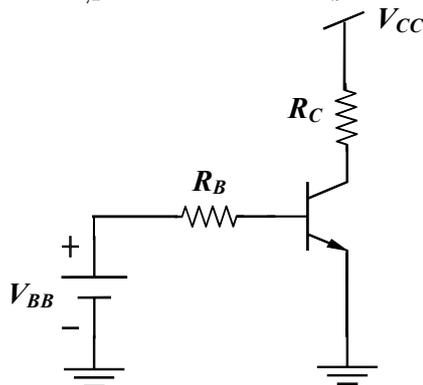


Figura 2

NOTA:

Modelo lineal por tramos básico en activa

$$I_C = \beta I_B \quad V_{BE} = V_{\gamma E}$$

Modelo lineal por tramos avanzado en activa

$$I_C = \beta \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) I_B \quad V_{BE} = V_{\gamma E} + r_{\pi} I_B$$

Modelo de Ebers - Moll aproximado en activa

$$I_C = \beta I_B \quad I_B = I_0 \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_t}\right)$$

## SOLUCIÓN EJERCICIO 2:

a)

$$V_{BB} - R_B I_B - V_{\gamma E} = 0 \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{\gamma E}}{R_B} = 46 \mu\text{A}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - \beta I_B R_C = 1,78 \text{ V}$$

Por tanto:

$$I_B = 46 \mu\text{A}, V_{BE} = 0,7 \text{ V}, I_C = \beta I_B = 4,6 \text{ mA}, V_{CE} = 1,78 \text{ V}$$

b)

$$V_{BB} - (R_B + r_{\pi}) I_B - V_{\gamma E} = 0 \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{\gamma E}}{R_B + r_{\pi}} = 44,2 \mu\text{A}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \\ I_C = \beta \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) I_B \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_C = \beta I_B \frac{1 + V_{CC}/V_A}{1 + \beta_0 I_B (R_C/V_A)} = 4,52 \text{ mA} \\ V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 1,84 \text{ V} \end{array} \right.$$

Por tanto:

$$I_B = 44,2 \mu\text{A}, V_{BE} = 0,788 \text{ V}, I_C = 4,52 \text{ mA}, V_{CE} = 1,84 \text{ V}$$

c)

$$I_B = I_0 \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_t}\right) \Rightarrow \begin{cases} V_{BE} = V_t \ln\left(\frac{I_C}{\beta I_0}\right) \\ I_C = \beta I_B \end{cases}$$

$$\text{Como } V_{BB} = R_B I_B + V_{BE} \Rightarrow V_{BB} = \frac{R_B}{\beta} I_C + V_t \ln\left(\frac{I_C}{\beta I_0}\right)$$

$$\text{Expresando } I_C \text{ en amperios } \Rightarrow 3 = 0,5 I_C + 0,025 \ln(I_C \cdot 10^{13})$$

**Ejercicio 3.** En el circuito de la figura 3, calcule:

- La corriente de polarización  $I_D$  (**0.5 p.**)
- La ganancia en modo diferencial  $v_{o1d}/v_{i1}$  (**1 p.**)
- La ganancia en modo común  $v_{o1c}/v_{i1}$  (**1 p.**)

DATOS

$$R = 1 \text{ k}\Omega; I_o = 2 \text{ mA}$$

$R_{eq} = 1 \text{ M}\Omega$  (resistencia equivalente de la fuente de corriente  $I_o$  en alterna)

Los transistores M1 y M2 son iguales, trabajan en saturación y los valores de sus parámetros de circuito equivalente en pequeña señal son:  $g_m = 2 \text{ mS}$ ,  $1/r_o = 0$

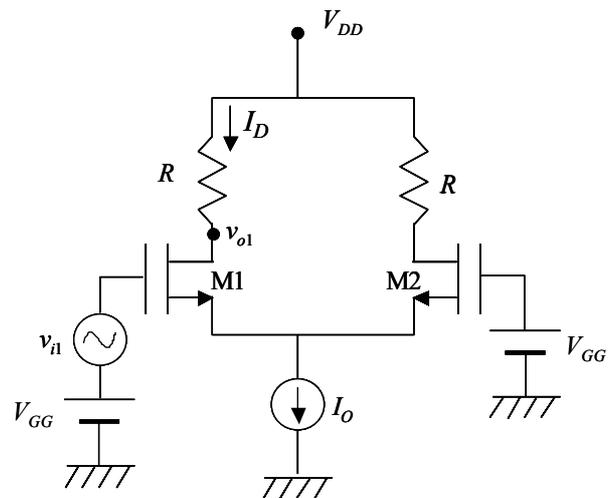
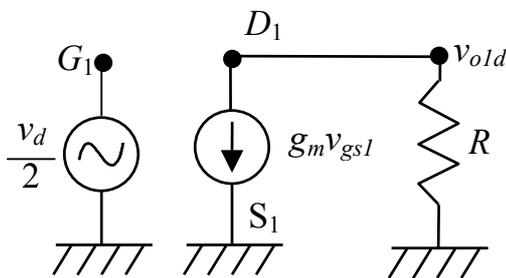


Figura 3

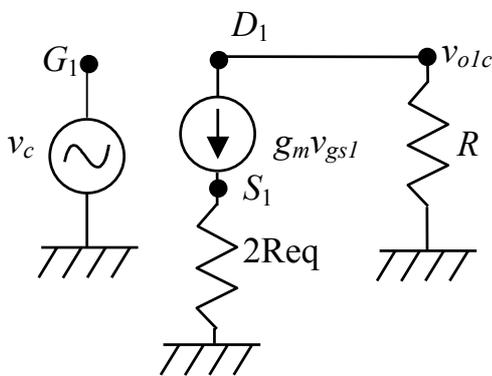
### SOLUCIÓN EJERCICIO 3:

a)  $I_D = I_o / 2 = 1 \text{ mA}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	



b)  $v_d = v_{i1}$   
 $v_{oid} = -g_m v_{gs1} R$   
 $v_{oid} = -g_m \frac{v_d}{2} R = -g_m \frac{v_{i1}}{2} R$   
 $\frac{v_{oid}}{v_{i1}} = -\frac{g_m R}{2} = -1$



c)  
 $v_c = \frac{v_{i1}}{2}$   
 $v_{oidc} = -g_m v_{gs1} R$   
 $v_{oidc} = -g_m \left( \frac{v_{i1}}{2} + 2R_{eq} \frac{v_{oidc}}{R} \right) R$   
 $v_{oidc} = -g_m \frac{v_{i1} R}{2} - g_m 2R_{eq} v_{oidc}$   
 $\frac{v_{oidc}}{v_{i1}} = \frac{-g_m R}{2(1 + g_m 2R_{eq})} = -2,5 \cdot 10^{-4}$

**Ejercicio 4.** Para el circuito de la figura 4, en  $t < 0$  el condensador está descargado y  $v_I = 0$ . En  $t = 0$  la señal  $v_I$  pasa de valer 0 V a valer  $V_{CC}$ .

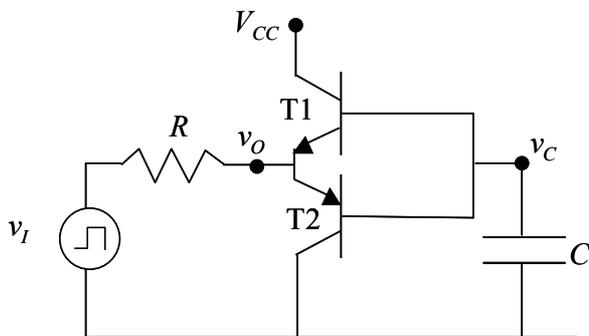


Figura 4

DATOS:

$V_{\gamma 1} = V_{\gamma 2} = 0,7 \text{ V}; \beta_1 = \beta_2 = 100; V_{CEsat1} = V_{CEsat2} = 0,2 \text{ V}$

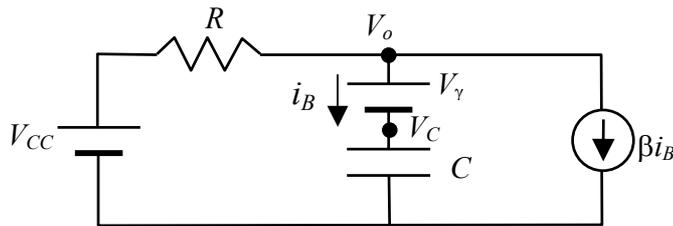
$V_{CC} = 10 \text{ V}; R = 1 \text{ M}\Omega; C = 0,1 \mu\text{F}$

Suponiendo que el modelo para  $T_1$  y  $T_2$  es el lineal por tramos de cuasiestática, calcule:

- a)  $V_o$  en  $t < 0$ , indicando el estado en que se encuentran  $T_1$  y  $T_2$  (0.8 p.)
- b)  $V_o$  en  $t = 0^+$ , indicando el estado en que se encuentran  $T_1$  y  $T_2$  (0.8 p.)
- c) la evolución de  $v_o$  para  $t > 0$  (0.9 p.)

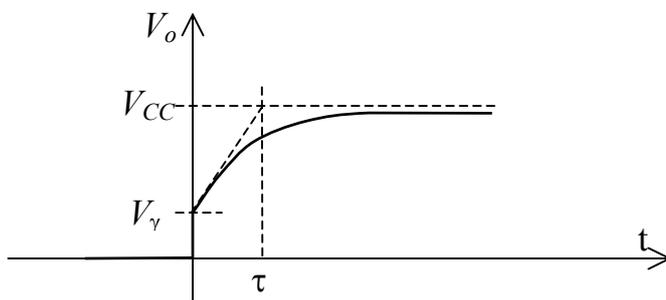
**SOLUCION AL EJERCICIO 4:**

- a) en  $t < 0$  el condensador está descargado  $\Rightarrow V_C = 0$  y  $V_I = 0 \Rightarrow V_{BE_1} = V_{BE_2} = 0 \Rightarrow T_1$  y  $T_2$  están en corte  $\Rightarrow V_O = 0$
- b) en  $t = 0^+$  por continuidad  $V_C = 0$ . Puesto que  $V_I = V_{CC} = 10V$ , entonces  $V_{EB_2} = V_{CC} - i_R R > 0$  donde  $i_R$  es la corriente a través de  $R$  entrante en los emisores  $\Rightarrow V_{BE_1} = -V_{EB_2} < 0 \Rightarrow T_1$  en corte y  $T_2$  en conducción  $V_{BC2} = 0 \Rightarrow T_2$  en activa  $\Rightarrow V_O = 0,7 V$
- c)  $V_o(0^-) = 0V$   
 $V_C(0^-) = V_C(0^+) = 0V$   
 Hipótesis: en  $t > 0^+$   $T_2$  está en activa y  $T_1$  en corte.  $V_o(0^+) = V_\gamma$



$$V_{CC} - V_o = Ri_B(1 + \beta) \left\{ \begin{array}{l} V_{CC} = V_o + R(1 + \beta)C \frac{dv_o}{dt} \\ V_o(0^+) = V_\gamma = 0,7V \end{array} \right\} \Rightarrow V_o = V_{CC} + (V_\gamma - V_{CC}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

donde  $\tau = RC(1 + \beta)$



Comprobación hipótesis:

$$V_{EC2} = V_o > V_{ECsat} \Rightarrow T_2 \text{ en activa}$$

$$V_{BE1} = V_C - V_o = -V_\gamma \Rightarrow T_1 \text{ en corte.}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de **enunciados** como para **borradores**, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de **enunciados** y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de **enunciados** es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para **borradores** **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Se permite la consulta de **LIBROS** o apuntes **ENCUADERNADOS** y el uso de **CALCULADORAS** de bolsillo. **NO** se permite la consulta de escritos en hojas sueltas. **NO** se permite el uso compartido de medios.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 24/06/03**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 27/06/03, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

**Ejercicio 1.** El circuito de la figura 1.1 tiene un diodo cuya característica I-V se muestra en la figura 1.2. Se le pide calcular:

- a) El rango de valores de  $V_I$  para el que el diodo está en OFF en ausencia de señal (**0,7p.**).
- b) El punto de trabajo ( $V_D, I_D$ ) para  $V_I = 10V$  (**0,8 p.**).
- c) La resistencia equivalente del diodo en pequeña señal y frecuencias medias para  $V_D = 550 mV$  (**1 p.**).

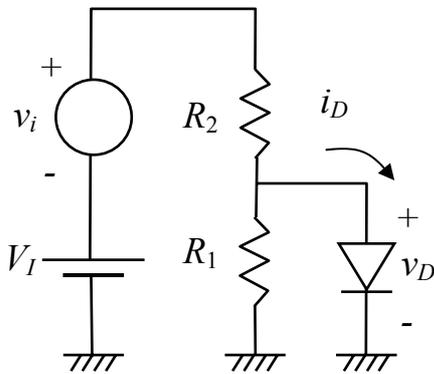


Fig. 1.1

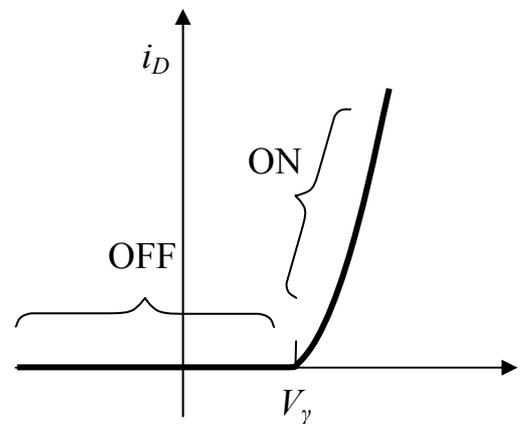


Fig. 1.2

$$\text{Modelo del diodo: } i_D = \begin{cases} 0 & \text{para } v_D \leq V_\gamma \text{ (estado OFF)} \\ a(v_D - V_\gamma)^2 + b(v_D - V_\gamma) & \text{para } v_D \geq V_\gamma \text{ (estado ON)} \end{cases}$$

DATOS:  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $V_\gamma = 0,50 \text{ V}$ ,  $a = 100 \text{ mA/V}^2$ ,  $b = 10 \text{ mA/V}$

**SOLUCIÓN**

$$a) \text{ En OFF } i_D = 0 \Rightarrow V_D = V_I \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \leq V_\gamma \Rightarrow V_I \leq V_\gamma \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 5,5V$$

b) De a) se deduce que el diodo está en ON:

$$I_D = a(V_D - V_\gamma)^2 + b(V_D - V_\gamma) \left\{ a(V_D - V_\gamma)^2 + \left( b + \frac{1}{R_1 // R_2} \right) (V_D - V_\gamma) + \left( \frac{V_\gamma}{R_1 // R_2} - \frac{V_I}{R_2} \right) = 0 \right.$$

$$V_D = \left( \frac{V_I - V_D - I_D}{R_2} \right) R_1$$

$$100(V_D - 0,50)^2 + 11,1(V_D - 0,50) - 0,45 = 0$$

$$\text{o alternativamente } aV_D^2 + \left( b + \frac{1}{R_1 // R_2} - 2aV_\gamma \right) V_D + \left( aV_\gamma^2 - bV_\gamma - \frac{V_I}{R_2} \right) = 0$$

$$V_D - 0,50 = \begin{cases} 0,032 > 0 \\ -0,143 < 0 \end{cases} \Rightarrow V_D = 0,532 \text{ V} \Rightarrow I_D = 100 \times 0,032^2 + 10 \times 0,032 = 0,422 \text{ mA}$$

c)

$$\frac{1}{r_{EQ}} = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{V_D=550mV} = 2a(V_D - V_\gamma) + b = 2 \times 100 \times (0,550 - 0,50) + 10 = 20 \text{ m}\Omega^{-1}$$

$$r_{EQ} = 50 \Omega$$

**Ejercicio 2.** En el circuito de la figura 2:

- Calcule la tensión que se mediría entre la base y el colector  $V_{BC}$ , con precisión hasta el mV, sin hacer ninguna aproximación acerca del valor de  $I_{ES}$  (1 p.).
- Sabiendo que  $I_E = 14 \text{ mA}$ , calcule  $I_{ES}$  (1 p.).

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

- c) Suponga ahora, que donde antes se midió la tensión  $V_{BC}$  se coloca ahora un generador de tensión continua de 650 mV con el positivo en el terminal de base del transistor. Calcule la corriente de colector, con precisión hasta el mA, e indique su sentido (0,5 p.).

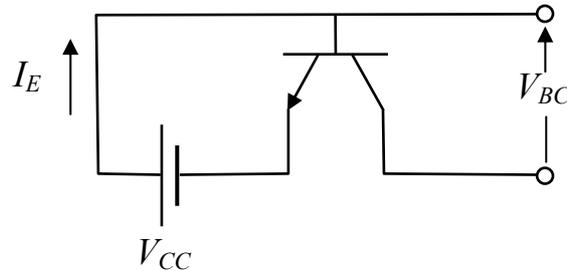


Fig. 2

DATOS:  $V_{CC}=0,625$  V;  $\alpha_R=0,818$ ;  $I_{CS}=10^{-12}$  A;  $V_t = kT/q=0,025$  V

**SOLUCIÓN:**

a)

$$I_C = 0 = -I_{CS} \left( \exp \frac{V_{BC}}{V_t} - 1 \right) + \alpha_F I_{ES} \exp \frac{V_{BE}}{V_t}$$

$$V_{BC} = V_t \ln \left( \frac{\alpha_F I_{ES} \exp 25}{I_{CS}} + 1 \right) = V_t \ln(\alpha_R \exp 25 + 1) = 0,620 \text{ V}$$

b)

$$I_E = I_{ES} \exp 25 - \alpha_R I_{CS} \left( \exp \frac{V_{BC}}{V_t} - 1 \right) = 14 \cdot 10^{-3}$$

$$I_{ES} = \frac{\alpha_R I_{CS} \exp 26 + 14 \cdot 10^{-3}}{\exp 25} = 8,64 \cdot 10^{-13} \text{ A}$$

c)

$$I_C = -I_{CS} \exp 26 + \alpha_F I_{ES} \exp \frac{V_{BE}}{V_t} = -I_{CS} \exp 26 + \alpha_R I_{CS} \exp 25 = -0,136 \text{ A}$$

con sentido saliente del colector

### Ejercicio 3.

Para el circuito de la figura 3.1:

- a) Calcule la corriente  $i_O$  en función de las señales de entrada  $v_1$  y  $v_2$ . Suponga que todos los FET están en saturación. (0,9 p.).

Para el circuito de la figura 3.2:

- b) Calcule la relación  $v_O/v_I$  suponiendo que los FET están en saturación (0,7 p.).  
 c) Sabiendo que los FET no entran en región gradual, ¿en qué rango de valores de  $v_O$  los FET operan en saturación? (0,9 p.).

DATOS:  $R = 1 \text{ k}\Omega$

Ambos FET son NORMAL-ON (de deplexión), con  $\kappa = 1 \text{ mA/V}^2$ ;  $|V_T| = 1 \text{ V}$

NOTA: No se necesita el valor de  $V_{DD}$  para resolver el ejercicio.

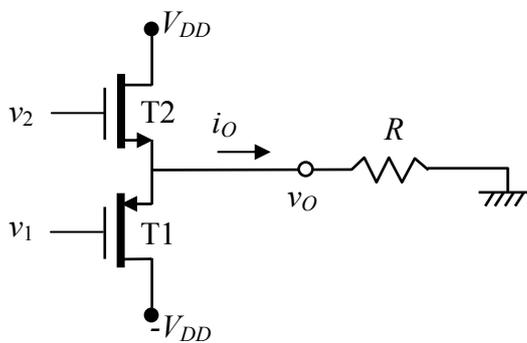


Fig. 3.1

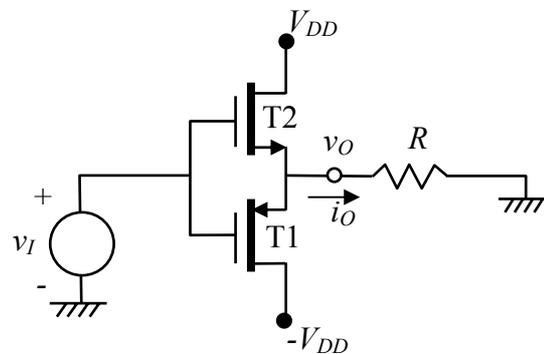


Fig. 3.2

### SOLUCIÓN:

a)

$$\begin{aligned} i_O &= i_{D2} - i_{D1} = \kappa(v_{GS2} - V_T)^2 - \kappa(v_{SG1} - V_T)^2 = i_o = \\ &= \kappa(v_2 - i_o R - V_T)^2 - \kappa(i_o R - v_1 - V_T)^2 = \kappa(v_2 - v_1 - 2V_T)^2 = \\ &= (v_2 + v_1 - 2i_o R) \Rightarrow i_o = \frac{\kappa(v_2 - v_1 - 2V_T)(v_2 + v_1)}{1 + 2R\kappa(v_2 - v_1 - 2V_T)} \end{aligned}$$

b)

$$v_1 = v_2 = v_I \Rightarrow i_o = \frac{\kappa(-2V_T)(2v_I)}{1 + 2R\kappa(-V_T)^2} \Rightarrow i_o (\text{mA}) = \frac{4}{5} v_I (\text{V})$$

$$v_O = i_o R \Rightarrow \frac{v_O}{v_I} = 0,8$$

c) Canal n:  $v_{GS_2}(n) = v_1 - v_O = \frac{v_O}{0,8} - v_O = 0,25v_O \geq V_T \Rightarrow v_O \geq \frac{V_T}{0,25} = 4V_T = -4V$

Canal p:  $v_{SG_1}(p) = -v_{GS}(n) = -0,25v_O \geq V_T \Rightarrow v_O \leq 4V$

Así  $|v_O| \leq 4V$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

#### Ejercicio 4.

El circuito de la figura 4.1, utilizado para desplazar el nivel de continua de la señal de entrada, se excita con el pulso dibujado en la figura 4.2.

- Calcule el valor de la tensión en bornas de la capacidad  $v_C$  y la tensión de salida  $v_O$  para el estado estacionario en el intervalo  $t < 0$  (**0,5 p.**).
- En  $t = 0$  se produce la transición y  $v_I$  pasa a valer  $-5$  V. Indique el valor de la tensión de salida  $v_O$  y el estado del diodo en el instante  $t = 0^+$  (**0,5 p.**).
- Obtenga la ecuación diferencial que rige la evolución de  $v_C$  en el intervalo  $0 < t < T$ , y calcule la expresión de  $v_O(t)$  en ese caso (**1 p.**).
- En  $t=T$  la tensión a la entrada vuelve a cambiar al valor  $V_F$ . Si  $T = 1$  ms, indique el valor de la tensión de salida  $v_O$  y el estado del diodo en el instante  $t = T^+$  (**0,5 p.**).

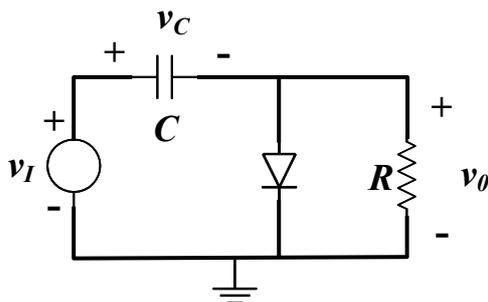


Figura 4.1

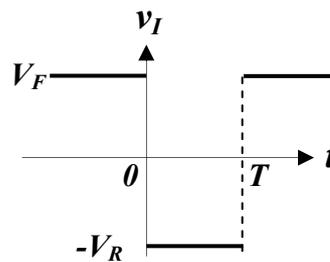


Figura 4.2

DATOS:

$$C = 100 \mu\text{F}; R = 100 \Omega; V_F = 7 \text{ V}; V_R = 5 \text{ V}$$

Para el diodo:

Modelo con tensión de codo  $V_\gamma = 0,5$  V y resistencia en directa  $r_F = 1\Omega$ .

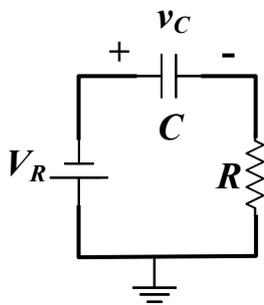
Efectos capacitivos internos despreciables

**SOLUCIÓN:**

- En estado estacionario, con  $v_I = V_F$ , no hay flujo de corriente, el condensador está cargado y  $v_C = V_F = 7$  V y  $v_O = 0$  V.

b) El valor de tensión en bornas del condensador no puede cambiar bruscamente, por lo que  $v_C(t=0^+) = v_C(t=0^-) = V_F = 7 \text{ V}$ . Por tanto,  $v_O = v_I - v_C = -V_R - V_F = -12 \text{ V}$ . Al estar polarizado negativamente, el diodo está en inversa.

c) El circuito equivalente en este intervalo es



$$C \frac{dv_C}{dt} = \frac{-V_R - v_C}{R} \Rightarrow RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = -V_R$$

$$\text{Resolviendo, } v_C(t) = -V_R + A \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

De la condición de contorno  $v_C(t=0^-) = v_C(t=0^+) = V_F$  deducimos  $A = V_F + V_R$ , y podemos calcular

$$v_O(t) = -V_R - v_C(t) = -(V_F + V_R) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = -12 \exp\left(-\frac{t(\text{ms})}{10}\right)$$

d) La tensión en bornas del condensador no cambia,

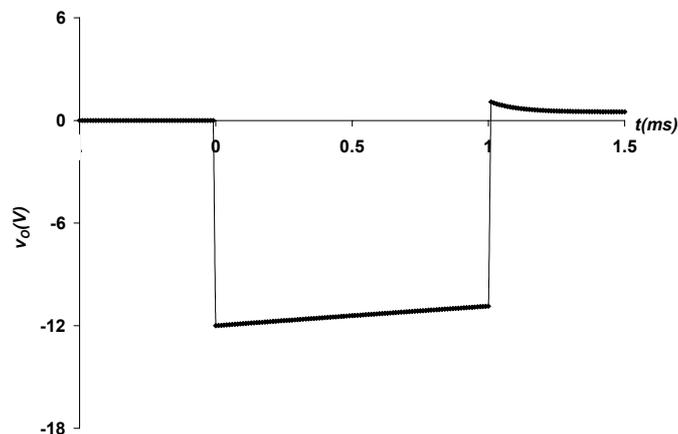
$$v_C(t = T^+) = v_C(t = T^-) = -V_R + (V_F + V_R) \exp\left(-\frac{T}{RC}\right) = 5,86 \text{ V}$$

La tensión de salida en este instante es  $v_O(t = T) = V_F - v_C(t) = 1,14 \text{ V} > 0,5 \text{ V} = V_\gamma$ .

El diodo está polarizado en directa.

NOTA

Si calculamos la evolución del voltaje de salida para el intervalo  $t > T$ , podemos representar la respuesta completa al pulso de entrada:



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ Se permite la consulta de **LIBROS** o apuntes **ENCUADERNADOS** y el uso de **CALCULADORAS** de bolsillo. **NO** se permite la consulta de escritos en hojas sueltas. **NO** se permite el uso compartido de medios.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 30/09/03**
  - ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 2/10/03, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**
-

**Ejercicio 1.** Se desea polarizar un diodo emisor de luz (LED) tal como se indica en la figura 1.1. El LED tiene una curva característica V-I de estática como la indicada en la figura 1.2, donde  $V_\gamma$  depende de la temperatura ( $T_J$ ) de la unión del LED. Esta dependencia es de la forma  $V_\gamma(T_J) = V_{\gamma_{amb}} - a(T_J - T_{amb})$ . La temperatura de la unión  $T_J$  depende la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), de la potencia eléctrica consumida por el LED ( $P$ ) y de la resistencia térmica entre la unión y el ambiente ( $\theta_{J-amb}$ ). La relación entre estas variables es  $T_J - T_{amb} = P \cdot \theta_{J-amb}$ . NOTA: en esta expresión se ha supuesto que la potencia de luz emitida es despreciable frente a la potencia eléctrica consumida. Se desea diseñar un circuito de forma que la temperatura de la unión en operación  $T_J$  sea 50°C superior a la  $T_{amb}$ .

- Calcule la potencia eléctrica consumida por el LED en ese caso **(0,8 p.)**.
- Calcule la corriente  $I$  del LED **(0,9 p.)**.
- Calcule el valor de la resistencia del circuito  $R$  para lograr el funcionamiento citado **(0,8 p.)**.

Datos:  $a = 10 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}; \quad V_{\gamma_{amb}} = 2 \text{ V}$   
 $\theta_{J-amb} = 100 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}; \quad V_A = 5 \text{ V}$

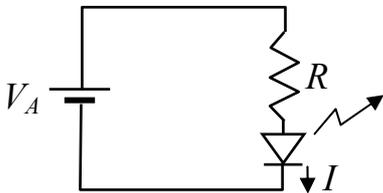


Fig. 1.1

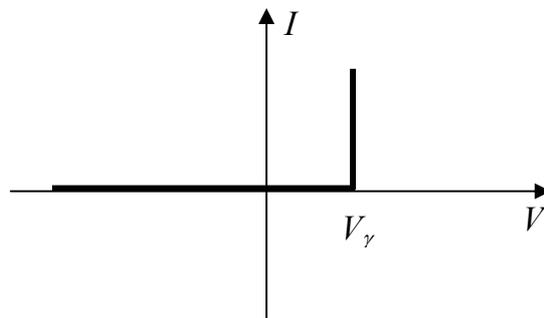


Fig. 1.2

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

a)  $T - T_{amb} = \Delta T = 50^\circ\text{C}; \quad P = \frac{\Delta T}{\theta_{Jamb}} = \frac{50^\circ\text{C}}{100^\circ\text{C}} \text{ W} = 0,5\text{W}$

b)

$$V_\gamma(T_{amb} + \Delta T) = V_{\gamma_{amb}} - a\Delta T = 2\text{V} - 0,5\text{V} = 1,5\text{V}$$

$$P = V \cdot I = V_\gamma \cdot I; \quad I = \frac{P}{V_\gamma} = \frac{0,5\text{W}}{1,5\text{V}} = 333\text{mA}$$

c)  $R = \frac{V_A - V_\gamma}{I} = \frac{5\text{V} - 1,5\text{V}}{1/3 \text{ A}} = \frac{3,5\text{V}}{0,33\text{A}} \cong 10,5\Omega$

**Ejercicio 2.** Se pretende utilizar un BJT real para una aplicación en la que operará con altas corrientes. Como consecuencia de ello, el efecto de la resistencia parásita asociada a la región semiconductor del colector (que es la región menos dopada) no es despreciable. Este efecto puede estudiarse con el circuito equivalente de la figura 2, en la que se muestra un BJT convencional con una resistencia en el terminal de colector. A este conjunto (BJT convencional + resistencia de colector) se le denominará *BJT de alta corriente*. Como se puede ver el *BJT de alta corriente* es un dispositivo de 3 terminales.

- Expresar la ecuación característica  $I_C = I_C(I_B, V_{C'E})$  de estática del *BJT de alta corriente* cuando el BJT convencional está funcionando en activa. Expresar esta ecuación característica en función de los parámetros  $R_S$ ,  $\beta_0$  y  $V_A$  (0,9 p.).
- En el plano  $I_C, V_{C'E}$  de las curvas características de salida del *BJT de alta corriente*, represente la región en la que el BJT convencional opera en activa (0,8 p.).
- Calcule el parámetro de pequeña señal  $r_0 = (\partial i_C / \partial v_{C'E})^{-1}$  del *BJT de alta corriente* en el punto de trabajo  $I_B = 20$  mA suponiendo que el BJT convencional está en activa. (0,8 p.).

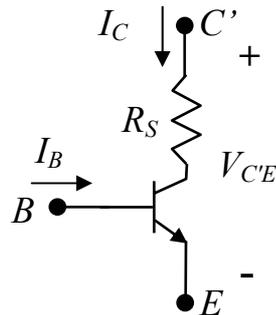


Figura 2

DATOS:

$$R_S = 2 \Omega.$$

Para el BJT convencional la ecuación en activa y estática teniendo en cuenta el efecto Early es  $I_C = \beta_0 \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) I_B$

$$\beta_0 = 100; V_A = 60 \text{ V}; V_{CE,sat} = 0,2 \text{ V}$$

### SOLUCIÓN EJERCICIO 2:

a) Llamando  $V_{CE}$  a la tensión colector emisor del BJT convencional:

$$\left. \begin{aligned} V_{C'E} &= I_C R_S + V_{CE} \\ I_C &= \beta_0 \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) I_B \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_C = \beta_0 \left( 1 + \frac{V_{C'E} - I_C R_S}{V_A} \right) I_B \Rightarrow I_C = \frac{\beta_0 (V_A + V_{C'E}) I_B}{V_A + \beta_0 I_B R_S}$$

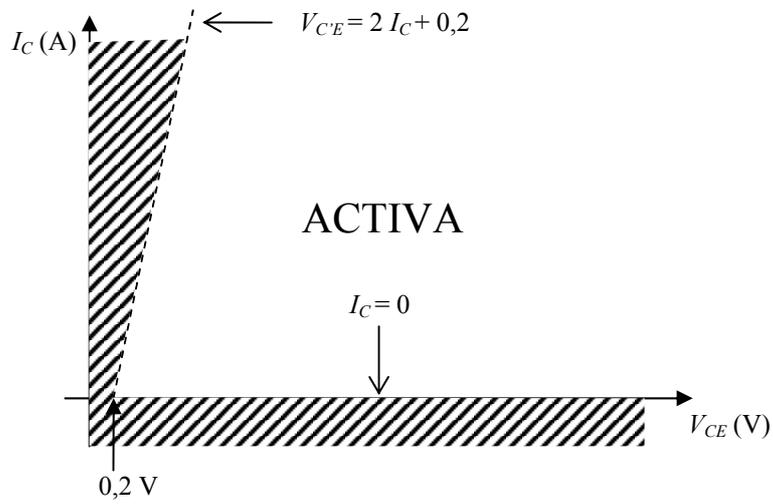
b)

Frontera con corte:  $I_C \geq 0$

$$\begin{aligned} \text{Frontera con saturación: } V_{CE} &\geq V_{CE,sat} \Rightarrow V_{C'E} = I_C R_S + V_{CE} \geq I_C R_S + V_{CE,sat} \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{C'E} (\text{V}) \geq 2 \cdot I_C (\text{A}) + 0,2 \end{aligned}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---

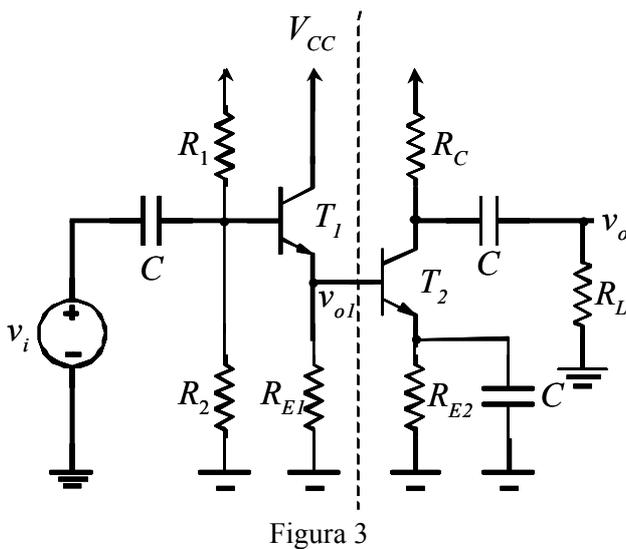
**CONTINUACIÓN SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**


c)

$$r_0 = \left[ \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_Q \right]^{-1} = \frac{V_A}{\beta_0 I_B} + R_S = 30 \, \Omega + 2 \, \Omega = 32 \, \Omega$$

**Ejercicio 3.** El circuito de la figura 3 presenta un amplificador con dos etapas en cascada, la primera en colector común y la segunda en emisor común, separadas en el dibujo por la raya discontinua. Un análisis aproximado del circuito de polarización ha dado los siguientes valores de continua:  $I_{C1} \approx I_{E1} = 1 \text{ mA}$ ;  $I_{C2} \approx I_{E2} = 1 \text{ mA}$ ;  $V_{CE1} = 5,7 \text{ V}$ ;  $V_{CE2} = 1,4 \text{ V}$ . Se pretende realizar un análisis parcial del circuito de pequeña señal, abordando el problema etapa por etapa.

- Dibujar el circuito equivalente de pequeña señal de la segunda etapa, dando el valor de los parámetros del circuito equivalente de pequeña señal del BJT (0,5 p).
- Calcular, para la segunda etapa, la resistencia de entrada  $R_{in2}$  y la ganancia de tensión  $v_o/v_{o1}$  (0,5 p).
- Indicar el margen dinámico a la salida asociado al transistor  $T_2$  (0,5 p).
- Dibujar el circuito equivalente de pequeña señal de la primera etapa, sustituyendo la segunda por su  $R_{in2}$  y dando el valor de los parámetros de pequeña señal (0,5 p).
- Calcular la ganancia de tensión de la primera etapa  $v_{o1}/v_i$  y la ganancia de tensión total  $v_o/v_i$  (0,5 p).

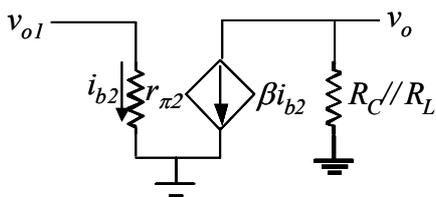


DATOS  
 $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$   
 $R_{E1} = 4,3 \text{ k}\Omega$   
 $R_{E2} = 3,6 \text{ k}\Omega$   
 $R_C = R_L = 4 \text{ k}\Omega$   
 $V_{CC} = 10 \text{ V}$   
 $C \rightarrow \infty$   
 Para ambos transistores  
 $V_T = 0,025 \text{ V}$   
 $V_{\gamma E} = 0,7 \text{ V}$   
 $V_{CESAT} = 0,2 \text{ V}$   
 $\beta = 100$   
 $r_o \rightarrow \infty$

Figura 3

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

a)



$$r_{\pi 2} = \beta \frac{V_T}{I_{C2}} = 2,5 \text{ k}\Omega$$

b)  $R_{in2} = r_{\pi 2} = 2,5 \text{ k}\Omega$ ;  $\frac{v_o}{v_{o1}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{\pi 2}} = -80$

c) El margen dinámico asociado a  $T_2$  vendrá dado por lo que antes ocurra, el corte o la saturación:

-Margen al corte ( $I_{C2} + i_{c2}(v_o) > 0$ )  $\Rightarrow v_o > -I_{C2}(R_C // R_L) = -2 \text{ V}$

-Margen a saturación ( $V_{CE2} + v_{ce2}(v_o) > V_{CESAT}$ )  $\Rightarrow v_o > V_{CESAT} - V_{CE2} = -1,2 \text{ V}$

Limita la saturación, luego el margen dinámico a la salida asociado a  $T_2$  es 1,2 V.

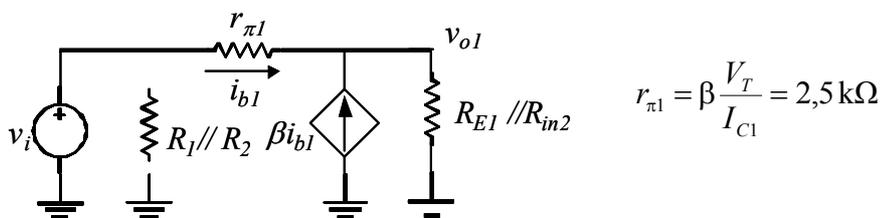
NOTA: La máxima excursión de la señal a la entrada de la segunda etapa,  $v_{o1}$ , puede ser  $\left| \frac{1,2}{v_o/v_{o1}} \right| = 0,015 \text{ V}$ . Se

podría comprobar que dicho valor está muy por debajo del margen dinámico asociado a  $T_1$ , luego es la segunda etapa la que limita el margen dinámico del circuito total.

APELLIDOS			
NOMBRE		N° DNI	

## CONTINUACIÓN SOLUCIÓN EJERCICIO 3:

d)



$$e) \frac{v_{o1}}{v_i} = \frac{(\beta + 1)(R_{E1} // R_{in2})}{r_{\pi 1} + (\beta + 1)(R_{E1} // R_{in2})} = 0,98$$

La ganancia total será el producto de las dos  $\frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{v_{o1}} \frac{v_{o1}}{v_i} = -78,4$

**Ejercicio 4.** En el circuito de la figura 4 los transistores Q1 y Q2 son MOST de acumulación en tanto que el Q3 es de deplexión. Se supone que todos operan en la región de saturación.

De estos transistores se conoce además que:

- Q1 y Q2 son iguales y su ecuación de transferencia es  $I_D = 100 (V_{GS} - 4)^2$ , donde  $I_D$  se expresa en mA y  $V_{GS}$  en voltios.

- Q3 responde a la ecuación de transferencia  $I_D = 100 (V_{GS} + 2)^2$ , donde  $I_D$  se expresa en mA. y  $V_{GS}$  en voltios.

Se pide:

- El valor de  $V_{DS2}$  (1 p.).
- El valor de  $I_{D1}$  (1 p.).
- Compruebe si el transistor Q3 esta realmente en saturación. (0,5 p.)

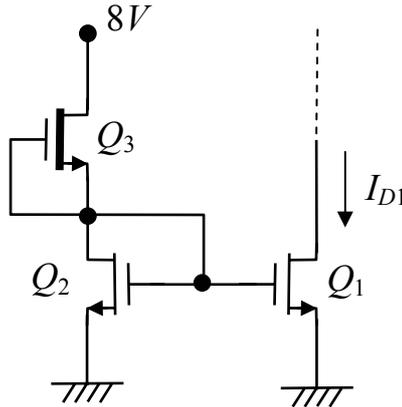


Figura 4

### SOLUCIÓN EJERCICIO 4:

- a) Como Q1 y Q2 son iguales y sus  $V_{GS}$  son iguales implica que sus  $I_D$  son iguales. Además, del circuito se desprende que las  $I_D$  de los transistores Q2 y Q3 son iguales. Por tanto,

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3}$$

Sustituyendo las expresiones de las corrientes del enunciado se obtiene:

$$V_{GS3} + 2 = V_{GS2} - 4 \text{ y, por tanto, } V_{GS2} = 6 \text{ V} = V_{DS2}$$

- b) Ya que  $I_{D1} = I_{D2}$  y sustituyendo el valor de  $V_{GS2} = 6 \text{ V}$  se obtiene

$$I_{D1} = 100 (6 - 4)^2 = 400 \text{ mA}$$

- c) De la expresión  $I_D = 100 (V_{GS3} + 2)^2$  deducimos que  $V_T = -2 \text{ V}$ , por tanto podemos escribir:

$$V_{DSAT3} = V_{GS3} - V_T = 0 + 2 = 2 \text{ V}.$$

Del apartado b)  $V_{GS3} = 2 \text{ V} = V_{DSAT3}$ .

El transistor Q3 está en la frontera entre regiones gradual y saturación, siendo válida la expresión utilizada.

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ Se permite la consulta de **LIBROS** o apuntes **ENCUADERNADOS** y el uso de **CALCULADORAS** de bolsillo. **NO** se permite la consulta de escritos en hojas sueltas. **NO** se permite el uso compartido de medios.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 29/01/04**
  - ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 3/02/04, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**
-

**Ejercicio 1.** El circuito de la figura 1.1 consta de un fotodiodo y un condensador. El fotodiodo puede modelarse con una fuente de corriente dependiente linealmente de la potencia luminosa incidente  $p_L(t)$  en paralelo con un diodo, tal y como muestra la figura 1.2. La constante de proporcionalidad de la fuente de corriente es la sensibilidad  $S$  del fotodiodo. Sabiendo que la señal luminosa  $p_L(t)$  varía con el tiempo como muestra la figura 1.3, se le pide calcular:

- a)  $i_C(t < 0)$  y  $v_C(t < 0)$  (0,7 p.)
- b)  $i_C(t = 0^+)$  y  $v_C(t = 0^+)$  (0,8 p.)
- c) El tiempo que tarda  $v_C(t)$  en alcanzar el valor  $10 \cdot V_t$  (1 p.).

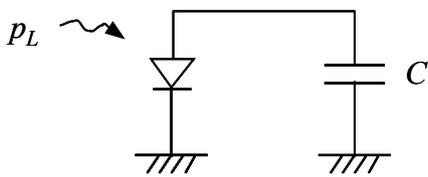


Figura 1.1

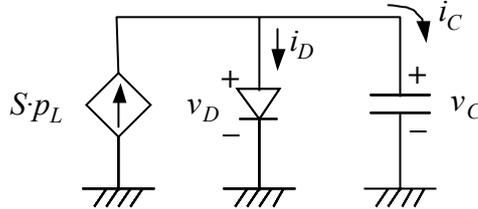


Figura 1.2

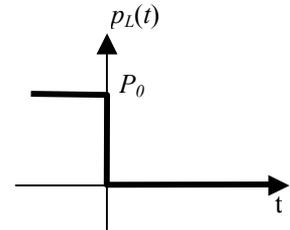


Figura 1.3

DATOS:  $V_t = 25 \text{ mV}$ ,  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $S = 0,5 \text{ A/W}$ ,  $I_s = 10^{-12} \text{ A}$ ,  $P_0 = 2 \text{ mW}$

Modelo del diodo:  $i_D(t) \approx I_s \exp\left(\frac{v_D(t)}{V_t}\right)$ , capacidades internas despreciables

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

a) Como para  $t < 0$ ,  $p_L = P_0$ , se parte de un estado estacionario inicial en el que las señales no varían con el tiempo y por tanto:

$$\left. \begin{aligned} i_C = C \frac{dv_C}{dt} = 0 &\Rightarrow i_D = S P_0 = 1 \text{ mA} \\ i_D \approx I_s \exp\left(\frac{v_D}{V_t}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_C = v_D = V_t \ln\left(\frac{S P_0}{I_s}\right) = 518 \text{ mV}$$

b) La tensión en el condensador no puede variar instantáneamente, por lo que:

$$v_D(t = 0^+) = v_D(t = 0^-) = 518 \text{ mV}$$

Como  $i_D \approx I_s \exp\left(\frac{v_D}{V_t}\right) \Rightarrow i_D(t = 0^+) = i_D(t < 0)$  y por tanto  $i_C(t = 0^+) = -S P_0 = -1 \text{ mA}$

c) Para  $t > 0$ ,  $p_L = 0$ :

$$-I_s \exp\left(\frac{v_C}{V_t}\right) = C \frac{dv_C}{dt} \Rightarrow dt = -\frac{C}{I_s} \exp\left(-\frac{v_C}{V_t}\right) dv_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t = \frac{C V_t}{I_s} \exp\left(-\frac{v_C}{V_t}\right) + A$$

La condición de contorno inicial es  $v_C(t = 0) = V_t \ln\left(\frac{S P_0}{I_s}\right) = 518 \text{ mV}$ , por lo que:

$$A = -\frac{C V_t}{I_s} \exp\left(-\frac{v_C(t=0)}{V_t}\right) = -\frac{C V_t}{S P_0} \Rightarrow t = C V_t \left( \frac{1}{I_s} \exp\left(-\frac{v_C}{V_t}\right) - \frac{1}{S P_0} \right)$$

Así, el valor  $v_C = 10 V_t$  se alcanza en el instante:

$$t_{final} = C V_t \left( \frac{e^{-10}}{I_s} - \frac{1}{S P_0} \right) \approx \frac{C V_t e^{-10}}{I_s} = 1,13 \text{ sg}$$

**Ejercicio 2.**

- a) En el circuito de la figura 2,  $D_1$  es un fotodiodo que recibe luz del LED  $D_2$  de tal forma que genera una fotocorriente. Calcular la corriente  $I$  suponiendo que el FET está en saturación. **(1.5 p.)**
- b) Verifique las hipótesis que haya usado en el apartado a) respecto al estado de funcionamiento de los diodos  $D_1$  y  $D_2$ . **(0.5 p.)**
- c) ¿Para qué valores de  $V$  el FET está en saturación? **(0.5 p.)**

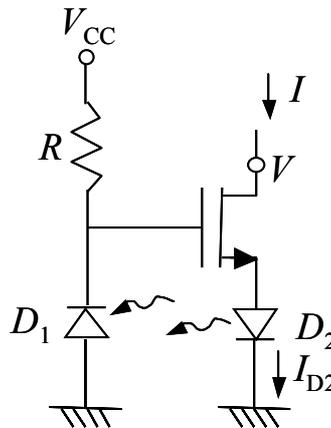


Figura 2

DATOS:

FET: FET de acumulación de canal n ;  $V_T = 1V$  ;  $k = 1mA/V^2$  ;

$V_{CC} = 12V$  ;  $R = 1M\Omega$

$D_1$  : Suponga que el modelo del fotodiodo cuando no está iluminado es lineal por tramos con  $V_{\gamma 1} = 0,5V$ . La corriente fotogenerada  $I_f$  es proporcional a la potencia luminosa  $P_l$  emitida por  $D_2$  de acuerdo con  $I_f = SP_l$  ( $S = 0,01A/W$ ).

$D_2$  : Suponga que el modelo del LED es lineal por tramos con  $V_{\gamma 2} = 2V$ . La potencia luminosa generada  $P_l$  es proporcional a la corriente que circula por el LED ( $I_{D2}$ ) de acuerdo con  $P_l = BI_{D2}$  ( $B = 0,1W/A$ ).

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**

- a) Como podremos comprobar posteriormente,  $D_1$  está en inversa y  $D_2$  en directa

$$I_{D2} = k(V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} = V_{CC} - I_f \cdot R - V_{\gamma 2}$$

$$I_f = \frac{V_{CC} - V_{GS} - V_{\gamma 2}}{R} = 10 - V_{GS} \quad I_f \text{ en } \mu A \quad V_{GS} \text{ en } V$$

$$I_f = SP_l = SBI_{D2} = SBK(V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_f = (V_{GS} - 1)^2; \quad I_f \text{ en } \mu A \quad V_{GS} \text{ en } V$$

$$V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1 = 10 - V_{GS}; \quad V_{GS}^2 - V_{GS} - 9 = 0$$

$$V_{GS} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + 4 \times 9}}{2} \begin{cases} 3,54V > V_T, \text{ solución válida} \\ -2,54V \text{ solución no válida} \end{cases}$$

$$I_{D2} = 6,46 \text{ mA}$$

- b) Fotodiodo  $D_1$ :  $V_{D1} = -V_G = -(V_{GS} + V_{D2}) = -5,54V < V_{\gamma 1}$ , luego está en inversa

LED  $D_2$ :  $I_{D2} = 6,46 \text{ mA} > 0$ , luego está en directa

- c)

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T; \quad V - V_{\gamma 2} > 2,54V; \quad V > 4,54V$$

**Ejercicio 3.** En el circuito amplificador de la figura 3, en el que los dos transistores son iguales y están en activa, calcule:

- a)  $I_{B1}$  e  $I_{B2}$  (0,8 p.)
- b)  $V_O$  (0,5 p.)
- c) La ganancia en pequeña señal y frecuencias medias  $v_o/v_i$  (1,2 p.)

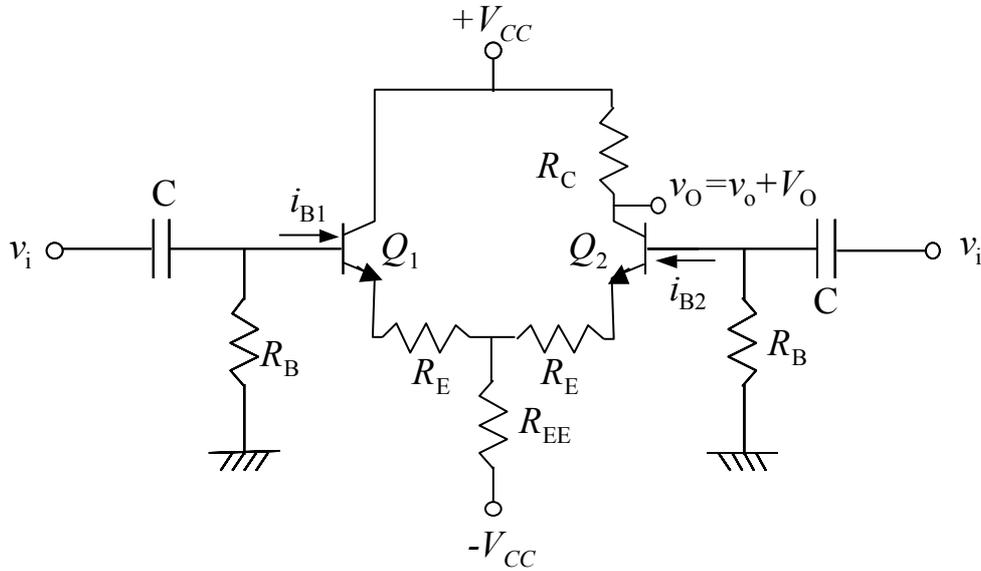


Figura 3

DATOS:

$\beta=100 \gg 1$ ;  $V_{BE1} = V_{BE2} = 0,7 \text{ V}$ ;  $V_i=0,025 \text{ V}$

Parámetros de pequeña señal a frecuencias medias de los transistores:  $r_{\pi}=V_t/I_B$ ,  $r_o \rightarrow \infty$

$R_B= 5 \text{ k}\Omega$ ;  $R_E= 50 \Omega$ ;  $R_{EE}= 7,1 \text{ k}\Omega$ ;  $R_C= 8 \text{ k}\Omega$ ;  $V_{CC}= 15 \text{ V}$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

- a) Las dos corrientes de base son iguales, a pesar de que el circuito no es simétrico por las mallas de colector de los transistores. En la malla de base y en continua se cumple que:

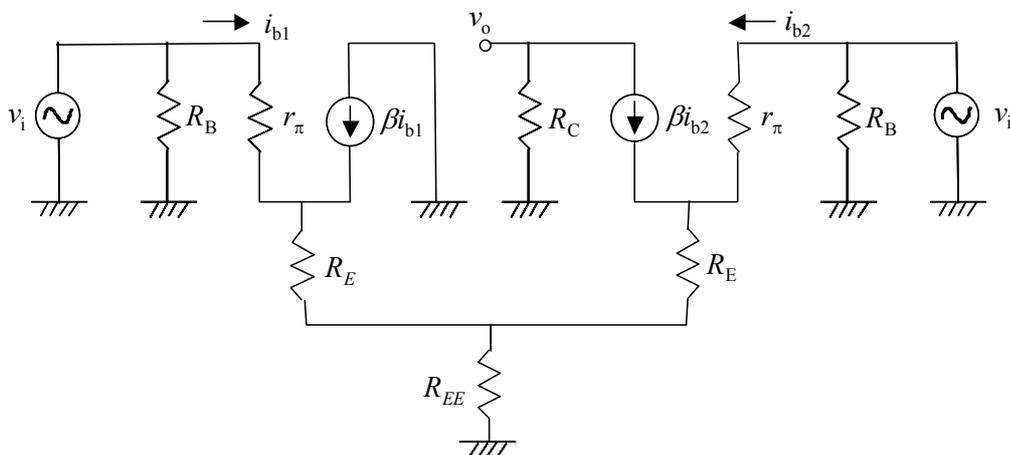
$$0 = R_B I_{B1} + V_{BE} + R_E I_{C1} + 2R_{EE} I_{C1} - V_{CC}$$

$$14,3 = 10 I_{B1} + 1420 I_{B1} \quad I_{B1} \text{ en mA}$$

$$I_{B1} = 0,01 \text{ mA} = I_{B2}$$

b)  $I_{C1} = 100 I_{B1} = 1 \text{ mA} \Rightarrow V_O = V_{CC} - R_C I_{C1} = 7 \text{ V}$

c)



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---

**CONTINUACIÓN SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

De acuerdo con el dibujo, se tiene:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta i_{b2} R_C}{v_i} = -\frac{R_C}{\frac{r_\pi}{\beta} + R_E + 2R_{EE}} = -0,56$$

Para ello se ha tenido en cuenta que:

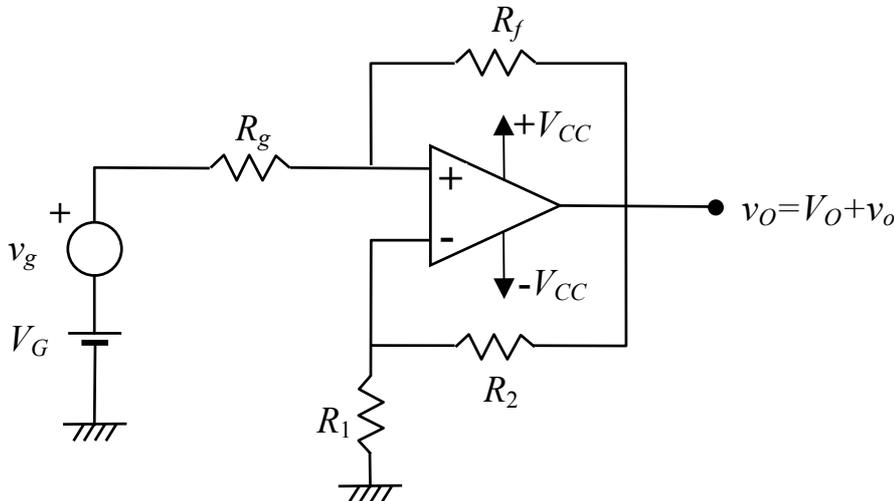
$$i_{b1} = i_{b2}$$

$$v_i = r_\pi i_{b2} + (\beta + 1) i_{b2} (R_E + 2R_{EE})$$

$$r_\pi = 2,5 \text{ k}\Omega$$

**Ejercicio 4.** El circuito de la figura 4 tiene un amplificador operacional ideal que está alimentado a  $V_{CC}=10\text{ V}$  y  $-V_{CC}=-10\text{ V}$ . Se pide:

- Calcular el valor de la componente continua de la tensión de salida,  $V_O$ . **(1 p)**
- Calcular el valor de la componente alterna de la tensión de salida  $v_o(t)$ . **(0.5 p)**
- Teniendo en cuenta las tensiones de alimentación del amplificador operacional, representar la forma de la tensión a la salida del circuito  $v_o(t)=V_O+v_o(t)$ . **(0.5 p)**
- Calcular el margen dinámico de la señal de entrada en alterna  $v_g(t)$  para que el amplificador operacional no entre en saturación a  $V_{CC}$ . **(0.5 p)**



DATOS:

$R_1=R_2=2\text{ k}\Omega$ ;  $R_g=5\text{ k}\Omega$ ;  $R_f=10\text{ k}\Omega$ ;  
 $v_g=3\cos(\omega t)\text{ V}$ ;  $V_G=1\text{ V}$ .

Figura 4

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4:**

a) Analizando el circuito para  $V_G$ , anulando el generador  $v_g(t)$ , se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} V^+ \left( \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_f} \right) - \frac{V_G}{R_g} - \frac{V_0}{R_f} &= 0 \\ V^- &= \frac{V_0}{2} \\ V^+ &= V^- \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \text{Despejando se obtiene: } V_0 &= V_G \frac{2R_f}{R_f - R_g} \\ \text{Sustituyendo: } V_0 &= 4\text{ V.} \end{aligned}$$

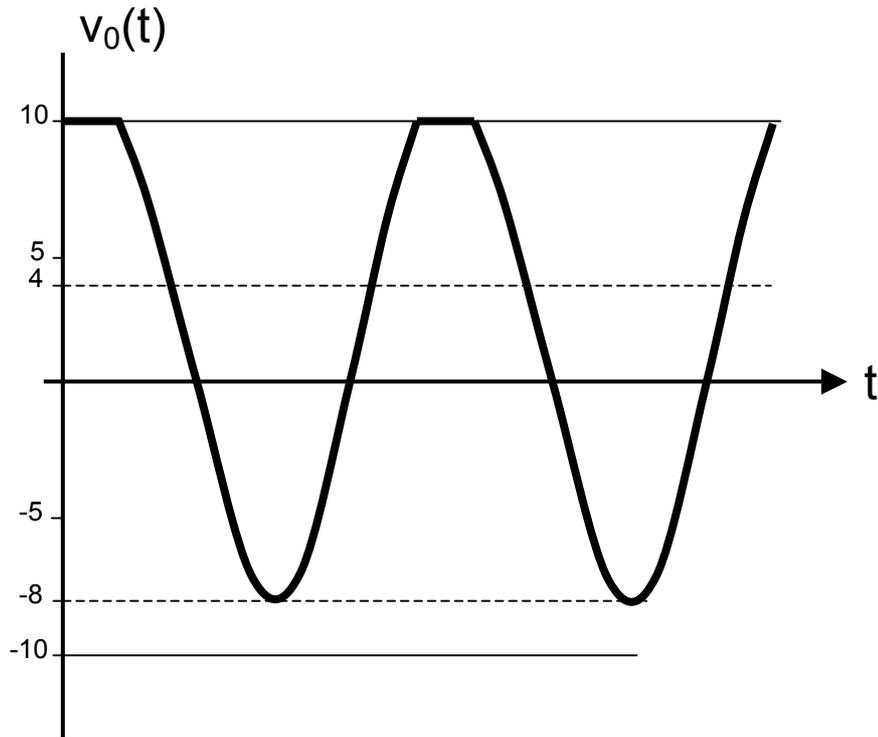
b) Anulando el generador  $V_G$  y analizando para  $v_g(t)$  se obtiene:

$$v_o(t) = v_g(t) \frac{2R_f}{R_f - R_g} \text{ donde sustituyendo valores se obtiene: } v_o(t) = 12\cos(\omega t)\text{ V}$$

APELLIDOS			
NOMBRE		N° DNI	

## CONTINUACIÓN SOLUCIÓN EJERCICIO 4:

c)

d) La amplitud máxima de  $v_o(t)$  es de 6 voltios. Por tanto:

a

$$v_g(t)_{\max} = \frac{v_o(t)}{4} = 1,5 \cos(\omega t) \text{ V}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Se permite la consulta de **LIBROS** o apuntes **ENCUADERNADOS** y el uso de **CALCULADORAS** de bolsillo. **NO** se permite la consulta de escritos en hojas sueltas. **NO** se permite el uso compartido de medios.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 05/07/04**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 09/07/04, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

### EJERCICIO 1:

El diodo túnel (también llamado diodo Esaki), cuyo símbolo circuital se muestra en la figura 1.1, es un diodo que se caracteriza porque el fenómeno de disrupción de la unión p-n se produce para tensiones de polarización directa ( $v_D > 0$ ). Como consecuencia, la curva característica  $i_D-v_D$  de un diodo túnel tiene una región de pendiente negativa. El modelado de este diodo para  $v_D > 0$  puede hacerse en buena aproximación por la siguiente ecuación:

$$i_D = \begin{cases} k_E v_D (V_E - v_D)^2 + I_S \left( \exp \frac{v_D}{V_t} - 1 \right) & 0 \leq v_D \leq V_E \\ I_S \left( \exp \frac{v_D}{V_t} - 1 \right) & v_D \geq V_E \end{cases}$$

donde  $k_E$ ,  $V_E$  e  $I_S$  son los parámetros modelo. La representación gráfica de esta ecuación es la curva característica que se muestra en la figura 1.2.

Para el circuito de la figura 1.3, que contiene un generador de pequeña señal  $v_g$  se le pide calcular:

- El valor del cociente  $I_O/I_G$  de polarización **(0,8 p.)**
- La resistencia equivalente del diodo túnel para la pequeña señal **(0,9 p.)**
- El valor del cociente  $i_o/i_g$  de pequeña señal **(0,8 p.)**

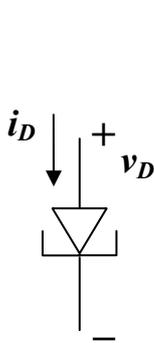


Figura 1.1

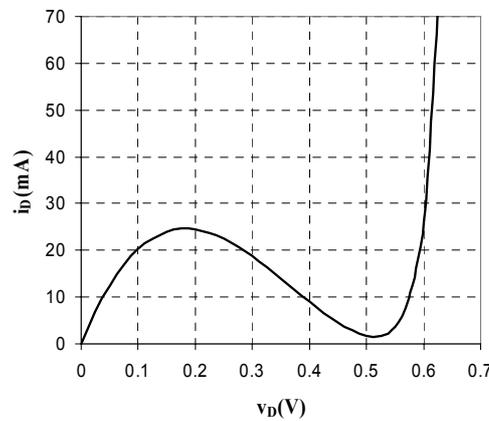


Figura 1.2

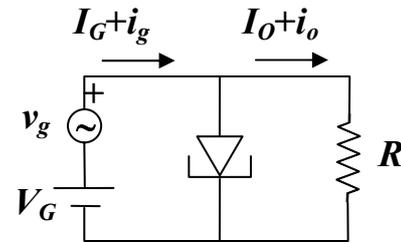


Figura 1.3

DATOS:  $V_t = 25 \text{ mV}$ ,  $R = 17,5 \Omega$ ,  $V_G = 350 \text{ mV}$   
 Del diodo:  $I_S = 1 \text{ pA}$ ,  $k_E = 1 \text{ A/V}^3$ ,  $V_E = 550 \text{ mV}$

### SOLUCIÓN

a)

$$I_O = \frac{V_G}{R} = 20 \text{ mA}$$

Como

$$V_D = V_G = 350 \text{ mV} < 550 \text{ mV} = V_E \Rightarrow I_D = k_E V_G (V_E - V_G)^2 + I_S \left( \exp \frac{V_G}{V_t} - 1 \right) =$$

$$= 14 \text{ mA} + 0.0012 \text{ mA} \approx 14 \text{ mA}$$

Tenemos que  $I_G = I_O + I_D = 20 \text{ mA} + 14 \text{ mA} = 34 \text{ mA}$

$$\text{Así: } \frac{I_O}{I_G} = \frac{20 \text{ mA}}{34 \text{ mA}} = 0,59$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---

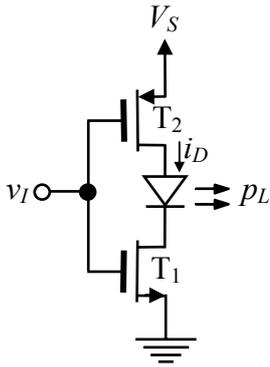
b)

$$\frac{1}{r_{EQ}} = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{v_D=V_G} = (k_E(V_E - V_G)^2 - 2k_E V_G(V_E - V_G)) + \frac{I_S}{V_t} \exp \frac{V_G}{V_t} =$$
$$= -100 \text{ mS} + 0.35 \text{ mS} \approx -100 \text{ mS} \Rightarrow r_{EQ} = -10 \Omega$$

c) Es un divisor de corriente:

$$i_o R = i_g (r_{EQ} // R) \Rightarrow \frac{i_o}{i_g} = \frac{r_{EQ}}{r_{EQ} + R} = \frac{-10 \Omega}{-10 \Omega + 17.5 \Omega} = -1.33$$

**EJERCICIO 2:**



Para el circuito de la figura:

- a) Demuestre que  $T_1$  y  $T_2$  no pueden estar a la vez en su región gradual de funcionamiento. **(1 p.)**
- b) Existe un único valor de  $v_I$  para el que ambos transistores están a la vez en saturación. Calcule ese valor. **(1 p.)**
- c) Sabiendo que la potencia luminosa  $p_L$  emitida por el diodo LED es proporcional a la corriente  $i_D$  que circula por él ( $p_L = Bi_D$ ), calcule el valor máximo de  $p_L$ , así como el valor de  $v_I$  para el que se obtiene ese máximo. **(0,5 p.)**

DATOS:

$$V_{T1} = V_{T2} = V_T = 1,5V \quad ; \quad k_1 = k_2 = k = 1 \text{ mA/V}^2; \quad V_{SS} = 10 \text{ V}; \quad \text{LED: } V_\gamma = 2 \text{ V}$$

$$B = 0,3 \frac{\text{W}}{\text{A}}$$

**SOLUCIÓN:**

- a)  $T1$  en región gradual  $\Rightarrow V_{DS1} \leq V_{GS1} - V_{T1}$   
 $T2$  en región gradual  $\Rightarrow V_{SD2} \leq V_{SG2} - V_{T2}$   
 Sumando ambas:

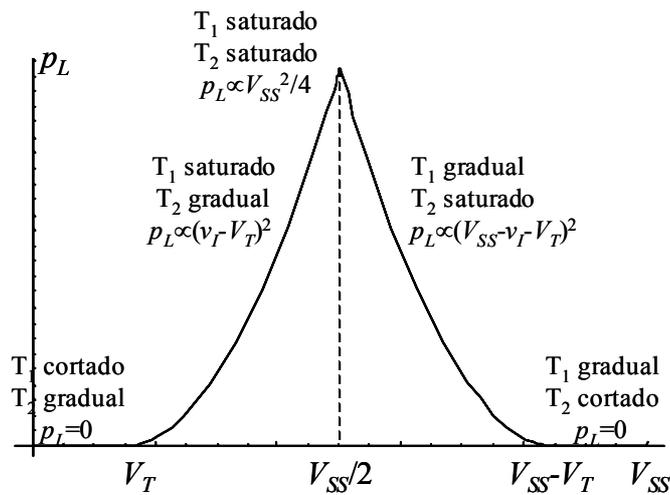
$$V_{SD1} + V_{SD2} \leq V_{GS1} + V_{SG2} - V_{T1} - V_{T2} \Rightarrow V_{SS} - V_D \leq V_{SS} - 2V_T \Rightarrow V_D \geq 2V_T$$

Pero  $v_D \leq V_\gamma = 2V < 2V_T = 3V$ , que es incompatible con lo anterior.

- b)  $T1$  en saturación  $\Rightarrow i_{D1} = k_1(v_{GS1} - V_{T1})^2 = k(v_I - V_T)^2$   
 $T2$  en saturación  $\Rightarrow i_{D2} = k_1(v_{SG2} - V_{T2})^2 = k(V_{SS} - v_I - V_T)^2$   
 Como  $i_{D1} = i_{D2} = i_D \Rightarrow k(v_I - V_T)^2 = k(V_{SS} - v_I - V_T)^2 \Rightarrow v_I = V_{SS}/2 = 2,5 \text{ V}$

(Ambos saturados  $\Rightarrow v_{DS1} \geq v_{GS1} - V_{T1}$  y  $v_{SD2} \geq v_{SG2} - V_{T2} \Rightarrow v_{SD1} + v_{SD2} \geq v_{GS1} + v_{SG2} - V_{T1} - V_{T2} \Rightarrow V_{SS} - v_D \geq V_{SS} - 2V_T \Rightarrow v_D \leq 2V_T$ , que efectivamente se cumple)

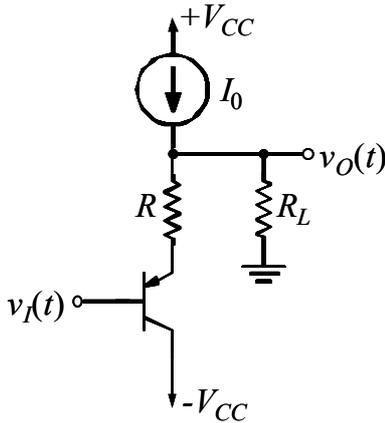
- c)



$p_L$  máxima se obtiene para  $v_I = \frac{V_{SS}}{2} = 5 \text{ V};$

$$i_D = k \left( \frac{V_{SS}}{2} - V_T \right)^2 = 12,25 \text{ mA} \Rightarrow p_{L \text{ max}} = 3,675 \text{ mW}$$

**Ejercicio 3.**



La tensión en la base del transistor del circuito es  $v_i(t) = V_I + v_i(t)$ , donde  $v_i(t)$  es una señal alterna y  $V_I = -3V$  una componente continua no deseada. La misión del circuito es eliminar esta componente continua.

- a) Calcule  $R$  para que el nivel de continua en la carga sea  $V_O = 0 V$ . Para ese valor de  $R$ , y suponiendo el TRB en activa, calcule además el punto de trabajo ( $I_C, V_{EC}$ ) del transistor (1 p.)
- b) La ganancia de tensión  $A_v = v_o/v_i$  de pequeña señal (0,5 p.)
- c) El valor de  $v_o$  para que el TRB se corte (0,5 p.).
- d) El valor de  $v_o$  para que el TRB se sature (0,5 p.).

**DATOS**

$V_{CC} = 12 V$ ;  $R_L = 1 k\Omega$ ;  $I_0 = 10 mA$  (fuente de corriente continua ideal);  $V_I = 0,025 V$

BJT:  $\beta = 100$ ;  $V_{EB} = 0,7 V$ ;  $V_{ECsat} \cong 0,2 V$ ;  $V_A \rightarrow \infty$

**SOLUCIÓN:**

a) Como  $V_O = 0 V$ , por  $R_L$  no circula corriente continua, luego:

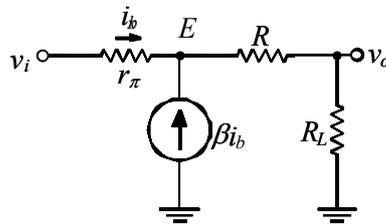
$$V_O = 0 = V_I + V_{EB} + I_0 R \Rightarrow R = -(V_I + V_{EB})/I_0 = 0,23 k\Omega$$

Además, en continua:  $I_C = \beta/(\beta+1)I_0 \cong I_0 = 10 mA$ ;  $V_{EC} = V_I + V_{EB} + V_{CC} = 9,7V$   
(referencia para la corriente de colector: positiva si sale del colector)

b)

$$r_\pi = \beta V_T / I_C \cong \beta V_T / I_0 = 0,25 k\Omega; r_o \rightarrow \infty$$

$$v_o = (\beta+1)R_L i_b; v_i = (r_\pi + (\beta+1)(R_L + R))i_b \Rightarrow A_v = (\beta+1)R_L / (r_\pi + (\beta+1)(R_L + R)) = 0,81$$



c)

$$i_c(t) \geq 0 \Rightarrow I_C + i_c(t) = I_C - \beta i_x(t) = I_C - \beta/(\beta+1) \times v_o(t)/R_L \cong I_C - v_o(t)/R_L \geq 0 \Rightarrow v_o(t) \leq I_C R_L = 10 V$$

d)

$$v_{EC}(t) \geq V_{ECsat} \Rightarrow V_{EC} + v_{ec}(t) = V_{EC} + v_e(t) = V_{EC} + (1 + R/R_L)v_o(t) \geq V_{ECsat} \Rightarrow v_o(t) \geq -(V_{EC} - V_{ECsat}) / (1 + R/R_L) = -8 V$$

### Ejercicio 4.

El circuito de la figura se utiliza para conmutar un diodo emisor de luz (LED). En el instante  $t = 0$  se cierra el interruptor. Se pide:

- Calcular la tensión  $V_E$  para  $t < 0$ . Diga en qué estado se encuentra el LED. **(0,9 p.)**
- Para  $t \gg 0$ , calcular el valor de  $V_E$ . Diga en qué estado se encuentra el LED. **(0,6 p.)**
- Calcular la evolución de la tensión,  $v_E(t)$  para  $t > 0$ . Dibujar la forma de la señal  $v_E(t)$ . **(1 p.)**

DATOS:

$$\begin{aligned}
 V_{CC} &= 10 \text{ V}; & R &= 75 \text{ } \Omega; \\
 R_B &= 1 \text{ k}\Omega; & R_E &= 11 \text{ } \Omega; & C &= 100 \text{ nF} \\
 V_{IN} &= 5 \text{ V} \\
 \text{LED: } V_\gamma &= 1,2 \text{ V} \\
 \text{BJT: } \beta &= 100; & V_{CEsat} &= 0,2 \text{ V} \\
 & & V_{\gamma E} &= 0,7 \text{ V}.
 \end{aligned}$$

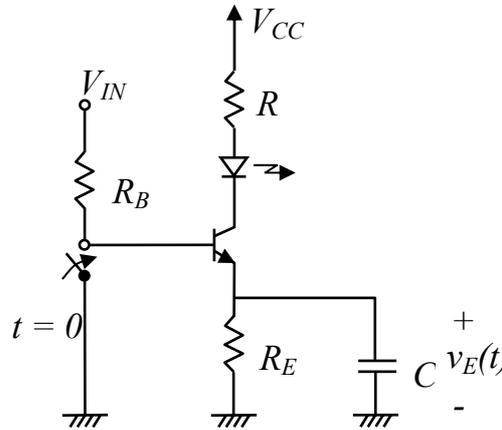


Fig. 1

### SOLUCIÓN:

a) En  $t < 0$  en BJT está en saturación

$$V_{CC} \cong R_C I_C + V_\gamma + V_{CEsat} + R_E I_C \Rightarrow I_C \cong \frac{V_{CC} - V_\gamma - V_{CEsat}}{R + R_E} = 100 \text{ mA} \rightarrow \text{El LED está encendido}$$

$$V_E = R_E I_C = 1,1 \text{ V}$$

Hay que comprobar que  $I_C < \beta I_B$

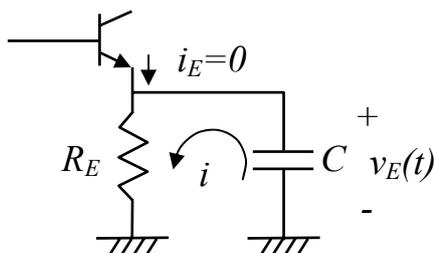
$$I_B = \frac{V_{in} - V_B}{R_B} = \frac{V_{in} - (V_E + V_{BE})}{R_B} = 3,2 \text{ mA}$$

$$I_C = 100 \text{ mA} < \beta I_B = 100 \cdot 3,2 \text{ mA}. \text{ Está en saturación}$$

b)  $t \gg 0$  el BJT está en corte.

$$V_B = 0; \quad I_B = I_C = I_E = 0; \quad V_E = 0 \rightarrow \text{El LED está apagado}$$

c) en  $t > 0$ : el condensador en  $t = 0^+$  tiene una tensión de  $V_E = 1,1 \text{ V}$



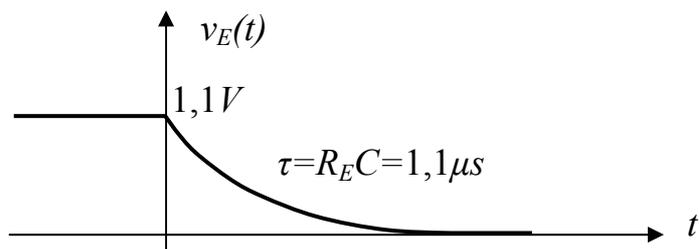
El condensador se descarga a través de  $R_E$ .  
La ecuación diferencial queda:

$$\begin{aligned}
 -C \cdot \frac{dv_e}{dt} &= \frac{v_e}{R_E} \\
 \frac{dv_e}{dt} + \frac{v_e}{R_E C} &= 0
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 v_E(t) = v_C(t) &= k \cdot e^{-t/R_E C} \\
 \text{condición inicial: } v_E(0^+) &= 1,1 = k
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_E(t) = 1,1 \cdot e^{-t/R_E C} \text{ (V)}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ Se permite la consulta de **LIBROS** o apuntes **ENCUADERNADOS** y el uso de **CALCULADORAS** de bolsillo. **NO** se permite la consulta de escritos en hojas sueltas. **NO** se permite el uso compartido de medios.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
- ⇒ **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 23/09/04**
- ⇒ **Fecha Prevista de Revisión: 28/09/04, a las 11:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

### EJERCICIO 1:

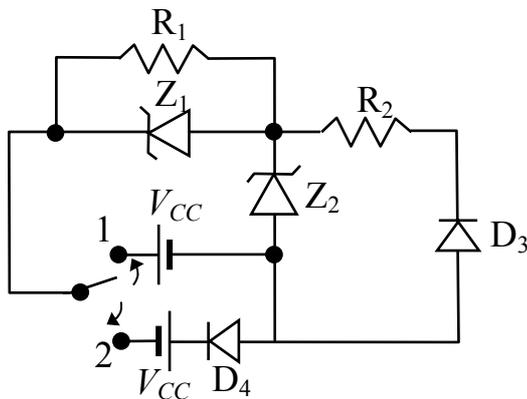
En el circuito de la figura 1, los cuatro diodos tienen una corriente inversa de saturación,  $I_s = 10 \mu\text{A}$ , y su funcionamiento se corresponde con la ecuación de Shockley:

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

para tensiones mayores que la de disrupción ( $-V_Z$ ).

Suponiendo despreciable cualquier efecto capacitivo en el circuito, se pide:

- Calcule el valor límite de la resistencia  $R_1$  para que el Zener  $Z_1$  no entre en disrupción si el conmutador está en la posición 1. **(1,0 p.)**
- El anterior valor de  $R_1$ , ¿es el máximo o el mínimo? Explique la respuesta. **(0,5 p.)**
- Calcule el valor de la resistencia  $R_1$  para que la corriente que atraviesa el diodo  $Z_1$  valga  $5 \mu\text{A}$  cuando el conmutador pasa a la posición 2 **(1,0 p.)**



Datos:

$$\begin{aligned} kT/q &= 0,025 \text{ V}; \\ V_{cc} &= 12 \text{ V}, \\ V_Z (Z_1, Z_2) &= 11 \text{ V}; \\ V_Z (D_3, D_4) &\rightarrow \infty; \\ R_2 &= 10 \text{ k}\Omega. \end{aligned}$$

Figura 1

### SOLUCIÓN

a) En el límite,

$$\left. \begin{aligned} V_{R_1} &= 11 \text{ V} = I_{R_1} R_1 \\ I_{R_1} &= 20 \mu\text{A} - 10 \mu\text{A} = 10 \mu\text{A} \end{aligned} \right\} R_1 = \frac{11}{10} = 1,1 \text{ M}\Omega$$

b) Es un valor máximo, porque si  $R_1$  aumenta, su caída de tensión también lo hace y el diodo  $Z_1$  entraría en disrupción.

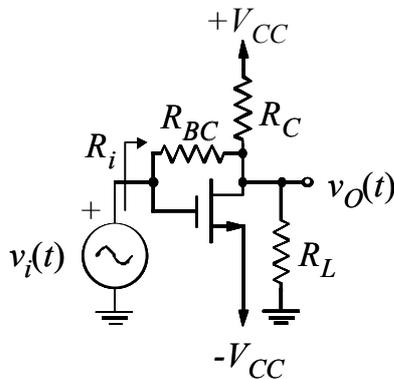
$$c) I_{Z_1} = I_s \left( \exp\left(\frac{qV_{Z_1}}{kT}\right) - 1 \right) \Rightarrow V_{Z_1} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{Z_1}}{I_s} + 1\right) = 0,025 \ln 1,5 = 0,01 \text{ V}$$

$$V_{Z_1} = V_{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{V_{R_1}}{I_{R_1}} = \frac{0,01 \text{ V}}{5 \mu\text{A}} = 2 \text{ k}\Omega$$

## EJERCICIO 2:

Para el circuito amplificador en fuente común de la figura:

- Calcule el valor de  $R_C$  que hace que el nivel de continua a la salida sea nulo,  $V_O = 0$  V. Compruebe que el transistor en estas condiciones está saturado (1,0 p.)
- Calcule la ganancia de voltaje en pequeña señal,  $v_o/v_i$  (1,0 p.)
- Calcule la resistencia de entrada al amplificador en pequeña señal,  $R_i$  (0,5 p.)



DATOS

$$V_{CC} = 5 \text{ V}; R_{BC} = 100 \text{ k}\Omega; R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

$$\text{MOSFET } V_T = 2,5 \text{ V}; k = 0,8 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-2}$$

$$\text{En saturación } I_D = k \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

NOTA: Considere despreciables los efectos capacitivos de los transistores.

Figura 2

## SOLUCIÓN

a) Si el transistor está saturado,  $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 = k(V_{CC} - V_T)^2 = 5 \text{ mA}$ .

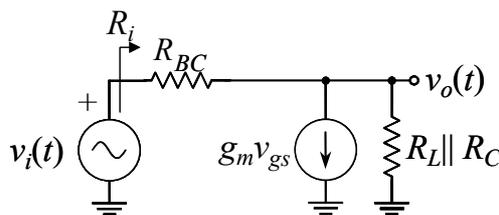
En continua, la ecuación del nudo de salida:

$$\frac{V_{CC} - V_O}{R_C} = \frac{V_O}{R_{BC}} + \frac{V_O}{R_L} + I_D \Rightarrow (V_O = 0) \Rightarrow \frac{V_{CC}}{R_C} = I_D \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC}}{I_D} = 1 \text{ k}\Omega$$

Se verifica la saturación del transistor:

$$V_{DS} = V_O - (-V_{CC}) = V_{CC} = 5 \text{ V} > V_{GS} - V_T = V_{CC} - V_T = 2,5 \text{ V}$$

b) El circuito equivalente de pequeña señal es el de la figura, en el que  $g_m = 2k(V_{GS} - V_T) = 4 \text{ mA}\cdot\text{V}^{-1}$ . En este circuito  $v_{gs} = v_i(t)$ , por lo que:



$$\frac{v_i(t) - v_o(t)}{R_{BC}} = \frac{v_o(t)}{R_C \parallel R_L} + g_m v_i(t) \Rightarrow A_v = \frac{v_o(t)}{v_i(t)} = -(g_m - 1/R_{BC})(R_C \parallel R_L \parallel R_{BC}) \approx -g_m(R_C \parallel R_L) = -2$$

$$c) R_i = \frac{v_i(t)}{\frac{v_i(t) - v_o(t)}{R_{BC}}} = \frac{1}{1 - A_v} R_{BC} \cong 33,3 \text{ k}\Omega$$

### Ejercicio 3.

Para el circuito amplificador con BJT's de la figura 3 se le pide calcular:

- La corriente de polarización  $I_L$ . Suponga que los dos transistores operan en activa **(0,8 p.)**
- El valor de la resistencia  $R_L$  para el que  $V_L = 0$ . Compruebe la hipótesis sobre el estado de los transistores **(0,7 p.)**
- La ganancia de corriente de pequeña señal,  $A_I = \frac{i_l}{i_g}$  **(1 p.)**

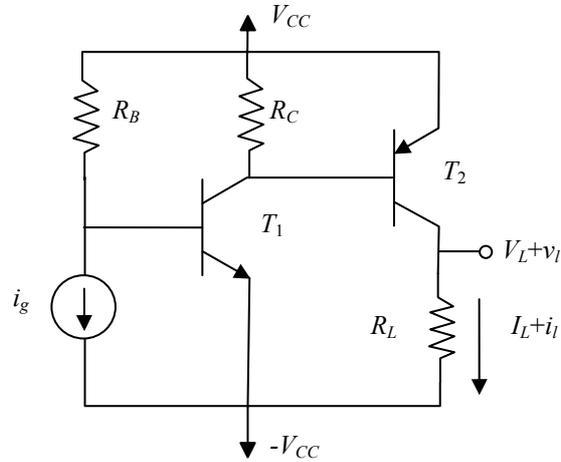


Figura 3

DATOS:

$$V_t = 25 \text{ mV}, V_{CC} = 5 \text{ V}, R_B = 475 \text{ k}\Omega, R_C = 700 \Omega$$

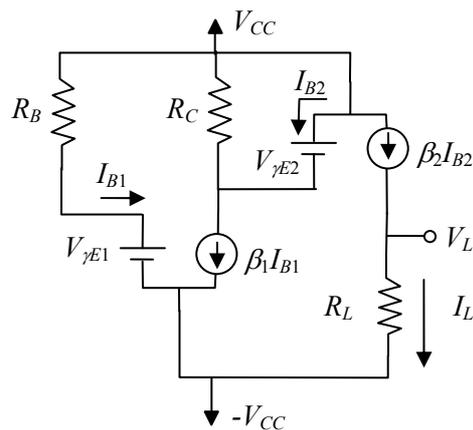
$$\text{Para } T_1 \text{ (nnp): } \beta_1 = 100, V_{A1} \rightarrow \infty, V_{\gamma E1} = 0,5 \text{ V}, V_{CEsat1} = 0,2 \text{ V}$$

$$\text{Para } T_2 \text{ (pnp): } \beta_2 = 50, V_{A2} \rightarrow \infty, V_{\gamma E2} = 0,7 \text{ V}, V_{CEsat2} = 0,2 \text{ V}$$

NOTA: Considere despreciables los efectos capacitivos de los transistores.

**SOLUCIÓN:**

a)



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

$$I_{B1} = \frac{2V_{CC} - V_{\gamma E1}}{R_B} = 20 \mu\text{A}$$

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = 2 \text{ mA}$$

$$I_{R_C} = \frac{V_{\gamma E2}}{R_C} = 1 \text{ mA}$$

$$I_{B2} = I_{C1} - I_{R_C} = 1 \text{ mA}$$

$$I_L = I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = 50 \text{ mA}$$

b)

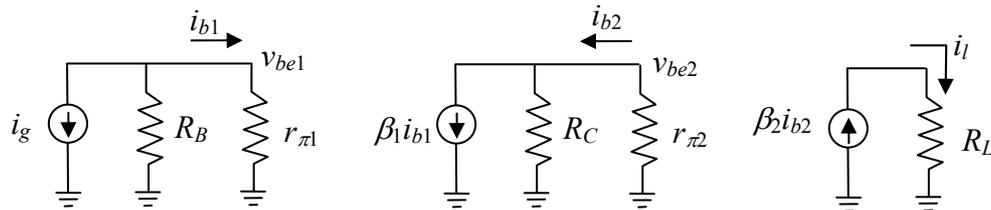
$$R_L = \frac{V_L - (-V_{CC})}{I_L} = 100 \Omega$$

Comprobación activa:

$$T_1: I_{B1} = 20 \mu\text{A} > 0; V_{CE1} = (V_{CC} - V_{\gamma E2}) - (-V_{CC}) = 9,3 \text{ V} > 0,2 \text{ V} = V_{CEsat1}$$

$$T_2: I_{B2} = 1 \text{ mA} > 0; V_{EC2} = V_{CC} - V_L = 5 \text{ V} > 0,2 \text{ V} = V_{ECsat2}$$

c)



$$r_{\pi 1} = \frac{V_t}{I_{B1}} = 1,25 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\pi 2} = \frac{V_t}{I_{B2}} = 25 \Omega$$

$$\left. \begin{aligned} i_{b1} &= -i_g \frac{R_B}{R_B + r_{\pi 1}} \\ i_{b2} &= \beta_1 i_{b1} \frac{R_C}{R_C + r_{\pi 2}} \\ i_l &= \beta_2 i_{b2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_I = \frac{i_l}{i_g} = -\frac{R_B}{R_B + r_{\pi 1}} \beta_1 \beta_2 \frac{R_C}{R_C + r_{\pi 2}} = -4.815$$

### Ejercicio 4.

El amplificador diferencial de la Figura 4.1 utiliza un fotodiodo iluminado (F) como fuente de corriente. El fotodiodo, que está iluminado por una fuente de luz constante, se puede caracterizar como un diodo en oscuridad en paralelo con una fuente ideal de corriente de valor  $I_F$  tal como se indica en la Figura 4.2. A su vez, el diodo en oscuridad se puede caracterizar como una fuente ideal de tensión de valor  $V_\gamma$  cuando está en ON y como un circuito abierto cuando está en OFF.

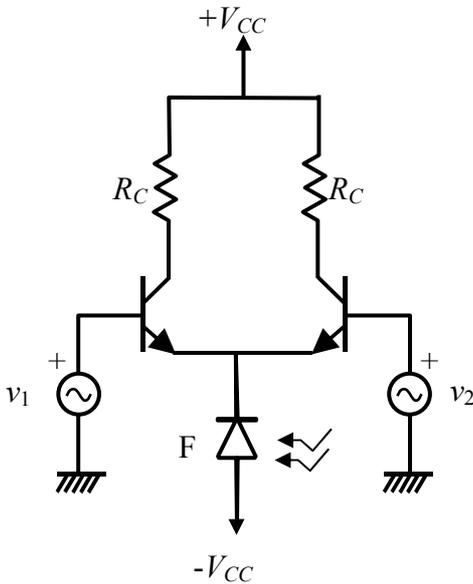


Figura 4.1

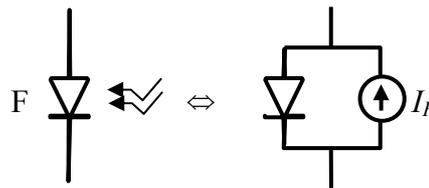


Figura 4.2

Suponiendo que el amplificador diferencial está en modo común, es decir,  $v_1=v_2$ , calcule el rango de valores de la señal de entrada  $v_1$  para el que:

- El fotodiodo se comporta como una fuente ideal de corriente (0,75 p.)
- Los transistores no están saturados (0,75 p.)
- Los transistores no están en corte (1 p.)

DATOS:  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ ,  $R_C = 0,8 \text{ k}\Omega$

Transistores iguales:  $V_{\gamma E} = 0,6 \text{ V}$ ;  $\beta = 100$ ;  $V_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$

Fotodiodo:  $V_\gamma = 0,6 \text{ V}$ ;  $I_F = 1 \text{ mA}$

NOTA: Considere despreciables los efectos capacitivos de los transistores.

#### SOLUCIÓN:

- Para que el fotodiodo se comporte como fuente ideal de corriente, la tensión en sus bornas (lado p respecto de lado n) debe ser menor que  $V_\gamma$ ,  $\Rightarrow -V_{CC}-v_N < V_\gamma$ . Puesto que la tensión en los emisores  $v_E = v_1 - V_{\gamma E}$  resulta que:  $v_1 > V_{\gamma E} - V_{CC} - V_\gamma = -10 \text{ V}$ .
- En modo común la corriente por los colectores de los 2 transistores es la misma,  $I_{C1}=I_{C2} \approx I_F/2=0,5 \text{ mA}$ . En el límite saturación-activa  $v_1 = V_{CC} - R_C I_F/2 - V_{CEsat} + V_{\gamma E} = 10 \text{ V}$ , es decir para que los transistores no estén en saturación,  $v_1 < 10 \text{ V}$ .
- En modo común y con los transistores en corte y las corrientes de los emisores de los transistores son ambas iguales a 0. Por tanto la corriente por el fotodiodo debe ser nula. Para que eso ocurra, la tensión en bornas del fotodiodo (lado p menos lado n) debe ser igual a  $V_\gamma \Rightarrow -V_{CC}-v_N = V_\gamma$ , es decir, en los emisores  $v_E = -10,6 \text{ V}$ . En el límite entre corte y activa siguen siendo válidas las ecuaciones de activa y por tanto  $v_E = v_1 - V_{\gamma E}$  de donde se deduce  $v_1 = -10 \text{ V}$ . Por tanto los transistores no estarán en corte si  $v_1 > -10 \text{ V}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
- ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
- ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
- ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
- ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
- ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2'5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.

► **Fecha Prevista Publicación de Calificaciones: 11 de Febrero de 2006**

► **Fecha Prevista de Revisión: 14 febrero, a las 11 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes de la revisión)**

---

**Ejercicio 1.** El circuito de la figura 1.1 es un regulador de tensión con diodo zener. La función del diodo es mantener una tensión constante en la resistencia de carga  $R_L$  con independencia de las variaciones en  $R_L$  y en  $V_I$ . En el diseño del regulador debe asegurarse que la corriente en el diodo zener se mantiene dentro de los límites  $-I_{Zmin}$  y  $-I_{Zmáx}$ . Utilizando el modelo lineal por tramos de la figura 1.2 para el diodo zener, se pide:

- a) Para  $V_I=15V$ , calcular los valores máximo y mínimo de  $R_L$  en el circuito regulador. **(1,3 puntos)**
- b) Para  $R_L=500 \Omega$ , calcular los valores máximo y mínimo de  $V_I$  en el circuito regulador. **(1,2 puntos)**

DATOS:  $V_Z=5V$ ;  $I_{Zmin}=10mA$ ;  $P_{Zmáx}=1W$ ;  $R=48,7\Omega$  ;  $-I_{Zmin} \geq I_D \geq I_{Zmax}$

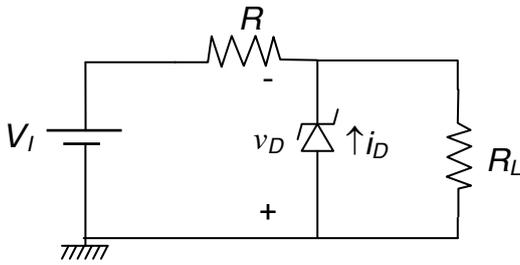


Figura 1.1

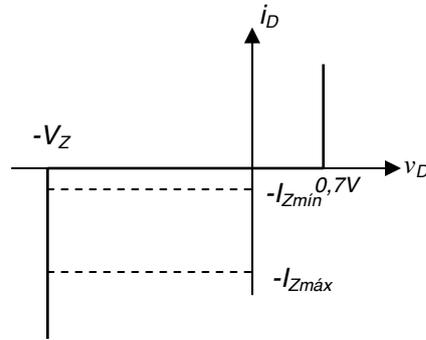
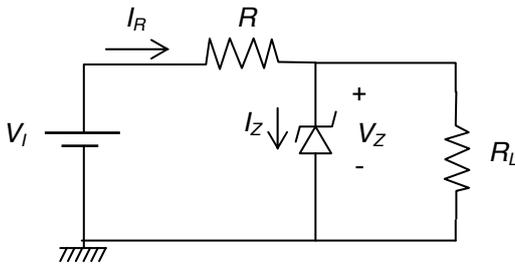


Figura 1.2

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1:**

a)



$$I_Z = -i_D; I_Z > 10 \text{ mA}$$

La potencia disipada en el diodo debe cumplir

$$P_Z < 1 \text{ W}; \quad V_Z I_Z < 1 \text{ W}; \quad I_Z < 200 \text{ mA}$$

$$\text{Por tanto: } 10 \text{ mA} < I_Z < 200 \text{ mA}$$

$$\text{La corriente por } R \text{ vale: } I_R = \frac{V_I - V_Z}{R} = 205 \text{ mA}$$

Para  $I_{Z\text{mín}}$  se cumple:

$$I_R = I_{Z\text{mín}} + I_{R_{L\text{máx}}} = I_{Z\text{mín}} + \frac{V_Z}{R_{L\text{mín}}} \quad \text{De donde: } R_{L\text{mín}} = 25,6 \Omega$$

Para  $I_{Z\text{máx}}$  se cumple:

$$I_R = I_{Z\text{máx}} + I_{R_{L\text{mín}}} = I_{Z\text{máx}} + \frac{V_Z}{R_{L\text{máx}}} \quad \text{De donde: } R_{L\text{máx}} = 936 \Omega$$

b) En este caso debe cumplirse igualmente que:  $10 \text{ mA} < I_Z < 200 \text{ mA}$

Para  $I_{Z\text{mín}}$  se cumple:

$$V_I = R \cdot I_R + V_D = R \cdot (I_{Z\text{mín}} + I_{R_L}) + V_D = R \cdot (I_{Z\text{mín}} + \frac{V_Z}{R_L}) + V_D = 5,97 \text{ V}$$

Para  $I_{Z\text{máx}}$  se cumple:

$$V_I = R \cdot I_R + V_D = R \cdot (I_{Z\text{máx}} + I_{R_L}) + V_D = R \cdot (I_{Z\text{máx}} + \frac{V_Z}{R_L}) + V_D = 15,23 \text{ V}$$

**Ejercicio 2.** El circuito de la figura 2 es un espejo de corriente diseñado para que  $I_1$  e  $I_2$  sean aproximadamente iguales. Sin embargo, la rotura de una pista ha dejado el colector de  $T_2$  en circuito abierto de forma que  $I_2 = 0$  aunque  $I_1 = 1,2$  mA. Se sabe que  $T_1$  está en modo activo directo de funcionamiento. Se pide:

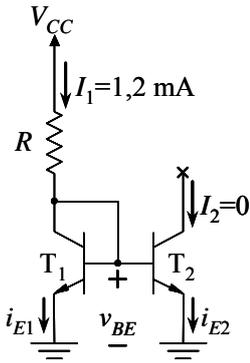


Figura 2

1. Decir en qué modo de funcionamiento está el transistor  $T_2$  (**0,5 puntos**)
2. Expresar la corriente  $i_{E1}$  en función de  $v_{BE}$ , de los parámetros del modelo de Ebers-Moll  $\alpha_F$ ,  $\alpha_R$ ,  $I_S$  y del voltaje térmico  $V_t$  (**1,0 puntos**)
3. Expresar la corriente  $i_{E2}$  en función de  $v_{BE}$ , de los parámetros del modelo de Ebers-Moll  $\alpha_F$ ,  $\alpha_R$ ,  $I_S$  y del voltaje térmico  $V_t$  (**0,5 puntos**)
4. Calcular la tensión en el colector del transistor  $T_2$ ,  $v_{CE2}$  (**0,5 puntos**)

DATOS:  $T_1$  y  $T_2$  son idénticos y están a la misma temperatura; sus parámetros para el modelo de Ebers-Moll son  $\alpha_F = 0,99$ ;  $\alpha_R = 0,33$ ;  $I_S = 10^{-15}$  A,  $V_t = 0,025$  V  $I_S = \alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2:**

1.  $T_1$  está en activa directa por lo que la unión base-emisor está en directa, así que  $T_2$  ha de estar a su vez en activa directa o saturado, y sólo esto último es compatible con la condición  $i_{C2} = 0$

$$2. \quad i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha_F} \left( \exp \frac{v_{BE}}{V_t} - 1 \right), \text{ puesto que } v_{BC1} = 0$$

3. Si la corriente de colector se anula, la ecuación de Ebers-Moll correspondiente permite establecer una relación entre  $v_{BE}$  y  $v_{CE2}$

$$i_{C2} = 0 \Rightarrow \exp \frac{v_{BC2}}{V_t} - 1 = \alpha_R \left( \exp \frac{v_{BE}}{V_t} - 1 \right)$$

Introducida en la otra, se obtiene:

$$i_{E2} = \frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{\alpha_F} I_S \left( \exp \frac{v_{BE}}{V_t} - 1 \right)$$

$$4. \quad I_1 = i_{E1} + i_{E2} = \frac{2 - \alpha_F \alpha_R}{\alpha_F} I_S \left( \exp \frac{v_{BE}}{V_t} - 1 \right) \Rightarrow v_{BE} = V_t \ln \left( 1 + \frac{I_1}{I_S} \frac{\alpha_F}{2 - \alpha_F \alpha_R} \right) = 0,6822 \text{ V}$$

$$v_{BC2} = V_t \ln \left( 1 + \frac{I_1}{I_S} \frac{\alpha_R \alpha_F}{2 - \alpha_F \alpha_R} \right) = 0,6545 \text{ V}$$

$$v_{CE2} = v_{BE} - v_{BC2} = 0,0277 \text{ V}$$

Como en saturación los  $I$ 's son despreciables frente a las exponenciales, se podría haber puesto directamente:

$$\begin{aligned} i_{C2} = 0 &\Rightarrow \exp \frac{v_{BC2}}{V_t} - 1 = \alpha_R \left( \exp \frac{v_{BE}}{V_t} - 1 \right) \Rightarrow v_{BC2} \cong V_t \ln(\alpha_R) + v_{BE} \Rightarrow \\ &\Rightarrow v_{CE2} \cong -V_t \ln(\alpha_R) = 0,0277 \text{ V} \end{aligned}$$

**Ejercicio 3.** En el circuito de la figura suponiendo que ambos transistores están trabajando en la región de saturación:

- 1) Calcular los valores de las tensiones de polarización  $V_{GS1}$ ,  $V_{GS2}$ . **(1 punto)**
- 2) Calcular el parámetro de pequeña señal  $g_m$  para el punto de polarización **(0,5 puntos)**
- 3) Calcular la impedancia de entrada en pequeña señal  $Z_i = \frac{v_i}{i_i}$  **(1 punto)**

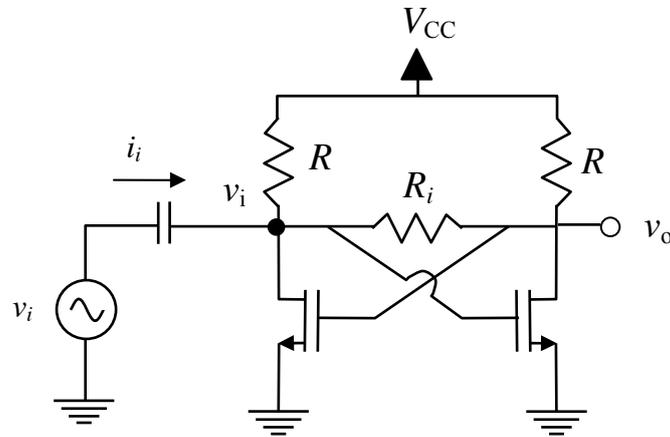


Figura 3

Datos:

Para ambos transistores:  $i_D = k(v_{GS} - V_T)^2$ ;  $V_T = 1 \text{ V}$ ;  $k = 1 \text{ mA V}^{-2}$ ;  $V_{CC} = 5 \text{ V}$

$R = 500 \Omega$      $R_i = 1 \text{ k}\Omega$

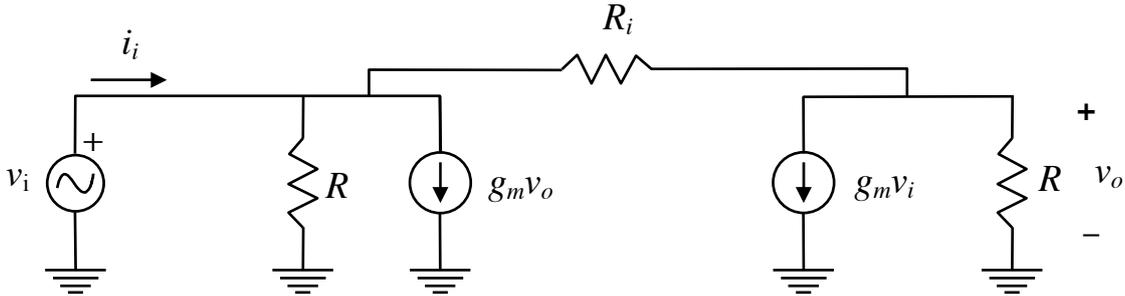
<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3:**

1) Por simetría  $\Rightarrow I_{Ri} = 0, V_{GS1} = V_{GS2} = V_{GS}; V_{CC} - I_D R = V_{GS} \Rightarrow V_{CC} - K(V_{GS} - V_T)^2 R = V_{GS}$  teniendo en cuenta que  $V_{GS} > V_T \Rightarrow V_{GS} = 3V$

2)  $g_m = 2k (V_{GS} - V_T) = 4 \text{ mA/V}$

3)



$$v_o = R \left( -g_m v_i - \frac{(v_o - v_i)}{R_i} \right) \Rightarrow v_o = \left( \frac{R}{R + R_i} - g_m (R // R_i) \right) v_i \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = \left( \frac{1}{R_i} - g_m \right) (R // R_i)$$

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{1}{\frac{1}{R} + g_m \frac{v_o}{v_i} + \frac{v_i - v_o}{R_i v_i}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_i} + \frac{v_o}{v_i} \left( g_m - \frac{1}{R_i} \right)} = \frac{R // R_i}{1 - (R // R_i)^2 \left( g_m - \frac{1}{R_i} \right)^2} = \infty$$

**Ejercicio 4.**

Para el amplificador diferencial de la figura se pide:

a) Tensión continua a la salida  $V_O$ , comprobando que los transistores están saturados. Considere para este apartado despreciable el efecto de modulación del canal de los transistores (efecto Early). **(0,8 puntos)**

b) En frecuencias medias y pequeña señal,  $T_3$  y  $T_4$  se comportan como resistencias. Calcule su valor. **(0,7 puntos)**

c) Calcule la ganancia de tensión en modo diferencial  $A_{v_d} = \frac{v_{od}}{v_d} = \frac{v_o}{v_{i1} - v_{i2}}$ .

Dado el bajo valor que se obtiene, ¿qué parámetro de los transistores  $T_3$  y  $T_4$  se podría manipular fácilmente para aumentarla? **(1 punto)**

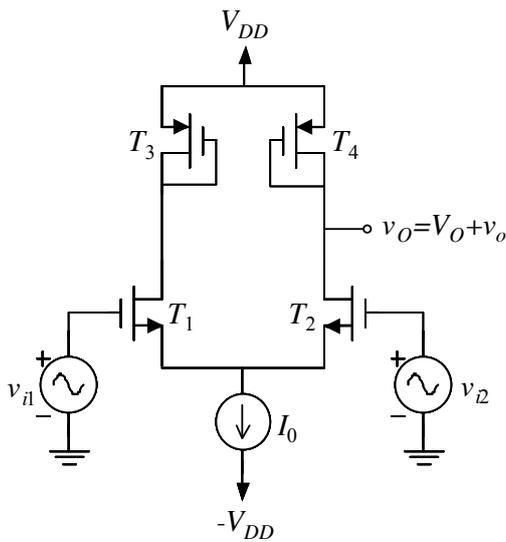


Figura 4

DATOS:

$V_{DD}=10$  V,  $I_0=1$  mA (ideal)

Transistores de acumulación de canal n y canal p de la misma tecnología con  $k=0,5$  mA/V<sup>2</sup>,  $|V_T|=1$  V,  $V_A=50$  V

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4:**

a) En continua, el circuito es simétrico por lo que  $I_0$  se reparte equitativamente por ambas ramas:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = \frac{I_0}{2}$$

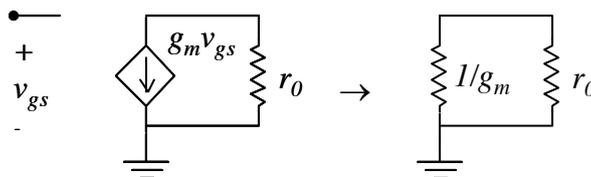
$$I_{D4} = k(V_{SG4} - V_T)^2 = k(V_{DD} - V_0 - V_T)^2 \Rightarrow V_0 = 8 \text{ V}$$

$T_3$  y  $T_4$  conducen ( $V_{SG3,4} = V_{DD} - V_0 > V_T$ ), y al tener  $G$  y  $D$  cortocircuitados, están siempre en saturación ( $V_{SD3,4} = V_{SG3,4} > V_{SG3,4} - V_T$ )

Por otro lado,  $I_{D1} = k(V_{GS1} - V_T)^2 = k(-V_{S1} - V_T)^2 \Rightarrow V_{S1} = -2 \text{ V}$ , y se comprueba que  $V_{DS1,2} = V_0 - V_{S1,2} > V_{GS1,2} - V_T = -V_{S1,2} - V_T$

b) Los parámetros de pequeña señal son idénticos para los cuatro transistores:  $g_m = 2\sqrt{kI_D} = 1 \text{ mS}$ ,  $r_0 = \frac{V_A}{I_D} = 100 \text{ k}\Omega$

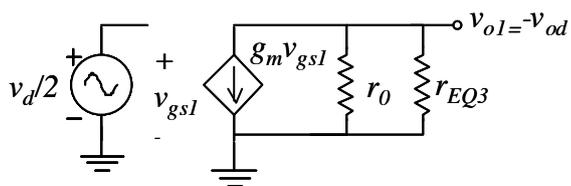
El circuito de pequeña señal para  $T_3$  o  $T_4$ :



de donde  $r_{EQ3} = r_{EQ4} = \left( \frac{1}{g_m} \parallel r_0 \right) \approx \frac{1}{g_m} = 1 \text{ k}\Omega$

c)

Circuito equivalente de pequeña señal en modo diferencial:



$$A_{v_d} = \frac{v_{od}}{v_d} = + \frac{g_m (r_{EQ3} \parallel r_0)}{2} = 0,5$$

Una forma sencilla de aumentar la ganancia en modo diferencial es aumentar la  $r_{EQ}$  de los transistores de carga, para lo cual podemos jugar con el parámetro relación de aspecto, ensanchando el dispositivo ( $\uparrow Z$ ) y acortándolo ( $\downarrow L$ )

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2'5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha prevista Publicación de Calificaciones: 20/09/06**
  - ⇒ **Fecha prevista Revisión: 25/09/06, a las 12:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes)**
-

**Ejercicio 1.** El circuito de la Figura 1 incorpora un diodo D2 y un diodo emisor de luz L1. Los dos diodos tienen la curva I-V de la Figura 2. El diodo L1 tiene una tensión umbral en directa  $V_{\gamma 1}=1\text{V}$  y el diodo D2 tiene una  $V_{\gamma 2}=0,5\text{V}$ . L1 está encendido si  $i_{L1} > 0$  y está apagado en caso contrario. Las transiciones aparecen como consecuencia de la variación de la tensión en el generador  $v_I$  que sigue la curva de la Figura 3. Se pide:

- Calcular  $i_{L1}$  y  $v_{L1}$  (con el criterio de signos indicado en la Figura 1) y diga si L1 está apagado para  $t < 0$  (1,0 pto).
- Para  $t \rightarrow \infty$  calcular  $i_{L1}$  (con el criterio de signos indicado en la Figura 1) y diga si L1 está apagado (0,5 pto).
- Calcular el tiempo a partir de que el generador  $v_I$  conmuta ( $t=0$ ) para que la corriente  $i_{L1}$  valga 0.1 mA (1,0 pto)

DATOS:

$V_Z = 10\text{V}$ ;  $C = 1\ \mu\text{F}$ ;  $R = 3\ \text{k}\Omega$ ;

Suponga despreciables las capacidades internas de los diodos.

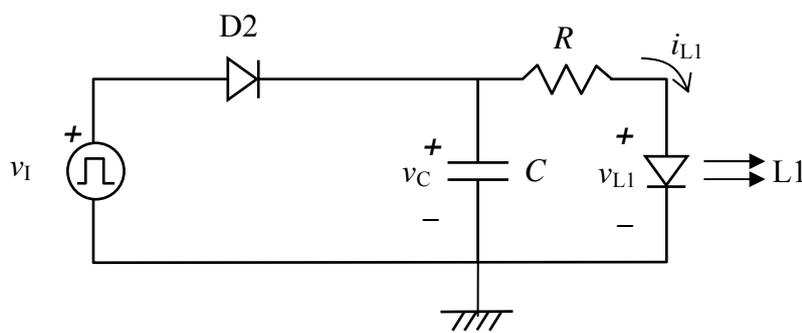


Figura 1

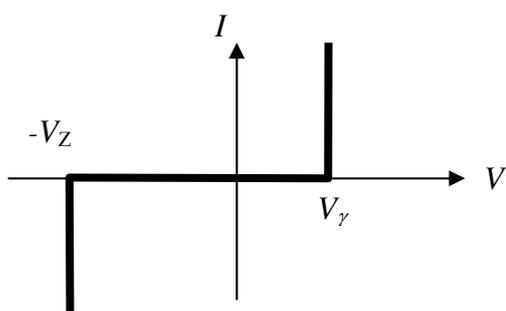


Figura 2

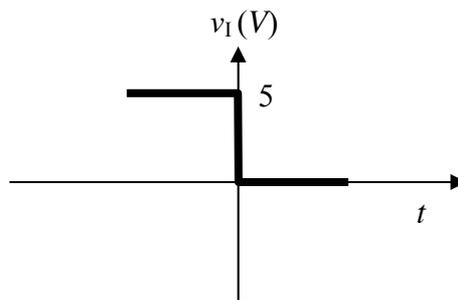


Figura 3

### SOLUCIÓN EJERCICIO 1

a) Suponemos que D2 y L1 están en directa

$$v_I = V_{\gamma 2} + Ri_{L1} + V_{\gamma 1}$$

$$i_{L1} = \frac{5\text{V} - V_{\gamma 2} - V_{\gamma 1}}{R} = 1.166\text{ mA}$$

lo que confirma las hipótesis anteriores.  $i_{L1} > 0$  por lo que L1 está encendido.  $v_{L1} = 1\text{V}$

b) Como ahora  $v_I = 0$ ,  $i_{L1} = 0$  y L1 está apagado.

c) En  $t=0$  se inicia la transición de L1 desde estar encendido a apagado. Dicha transición es debida a que el condensador C no se descarga instantáneamente.

$$v_C(t=0^-) = v_I(t=0^-) - v_{D2}(t=0^-) = 4.5\text{ V}$$

$$i_{L1} = -C \frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{v_C(t) - V_{\gamma 1}}{R}$$

$$RC \frac{dv_C(t)}{dt} + v_C(t) = V_{\gamma 1}$$

$$v_C(t) = V_{\gamma 1} + B \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \Rightarrow v_C(0) = V_{\gamma 1} + B \Rightarrow B = 3.5\text{ V}$$

$$i_{L1} = -C \frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{1}{R} B \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) = 0.1\text{ mA}$$

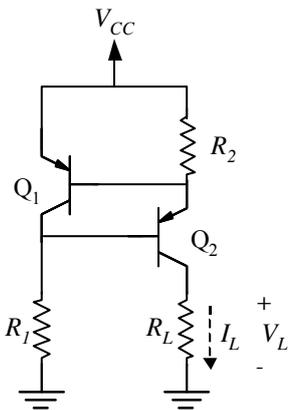
<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---

$$t = RC \ln\left(\frac{B}{0.1 \text{ mA} \cdot R}\right) = 7.4 \text{ ms}$$

**Ejercicio 2.** El circuito de la Figura 4 se diseña para suministrar una corriente continua constante  $I_L$  a la carga  $R_L$ . Para estudiar el comportamiento de los transistores emplee el modelo lineal por tramos.

- a) Suponiendo que ambos transistores  $Q_1$  y  $Q_2$  están en activa, y despreciando las corrientes de base frente a las otras corrientes del circuito, calcule para cada uno de ellos el valor de la corriente de colector,  $I_{C1}$  e  $I_{C2}=I_L$ . **(1 p)**
- b) Justifique la pertinencia de haber despreciado las corrientes de base, tomando como criterio que su valor no supere el 15% de la corriente de cualquier colector. **(0,7 p)**
- c) Compruebe que el transistor  $Q_1$  no está saturado, y especifique el valor máximo que puede tener la tensión en la carga  $V_L$  para que  $Q_2$  no se sature y permita por tanto que el circuito funcione como fuente de corriente. **(0,8 p)**



DATOS

$$V_{CC}=10 \text{ V}; R_1=10 \text{ k}\Omega; R_2=62 \text{ }\Omega$$

Transistores pnp idénticos

$$\text{Modelo lineal por tramos: } V_{EB}=V_{\gamma E}=0.7 \text{ V}; V_{EC\text{SAT}}=0.2 \text{ V}; \beta=100$$

Figura 4

SOLUCIÓN EJERCICIO 2

- a) Llamando  $I_1$  a la corriente que atraviesa  $R_1$ , e  $I_2$  a la que atraviesa  $R_2$ :

$$V_{CC} = V_{EB1} + V_{EB2} + R_1 I_1 = 2V_{\gamma E} + R_1 I_1 \Rightarrow I_1 = 0.86 \text{ mA} \approx I_{C1}$$

$$V_{EB1} = R_2 I_2 \Rightarrow I_2 = 11.29 \text{ mA} \approx I_{E2} \approx I_{C2}$$

- b) Puesto que  $\beta=100$ ,  $I_{B1} < 0.15 I_{C1}$  e  $I_{B2} < 0.15 I_{C2}$

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta} \approx 9 \text{ }\mu\text{A} < 0.15 I_2 = 1.69 \text{ mA}; \quad I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta} \approx 113 \text{ }\mu\text{A} < 0.15 I_1 = 129 \text{ }\mu\text{A}$$

- c)  $Q_1$  no está saturado porque  $V_{EC1} = 2V_{\gamma E} = 1.4 \text{ V} > V_{EC\text{sat}}$

$$\text{Para que } Q_2 \text{ no se sature } V_{EC2} = V_{CC} - V_{\gamma E} - V_L > V_{EC\text{sat}} \Rightarrow V_L < 9.1 \text{ V}$$

**Ejercicio 3.** El transistor compuesto de la Figura 5 combina las virtudes de los MOSFETs y los bipolares: como aquéllos, tiene corriente de puerta nula, como éstos, presenta una transconductancia muy elevada. Considerado como transistor unitario con la asignación de terminales que se ve en la figura, sus relaciones corriente-tensión son formalmente idénticas a las de un MOSFET de canal n. Se suponen conocidos los parámetros de los transistores elementales ( $k$  y  $V_T$  para el MOSFET y  $V_\gamma$ ,  $\beta$  y  $V_{CE(sat)}$  para el bipolar).

a) Demuestre que, cuando los transistores que lo forman están en activa, el transistor compuesto de la figura cumple la ley  $i_{DC} = k_C(v_{GSC} - V_{TC})^2$ , donde el subíndice C hace referencia a los parámetros del transistor compuesto. Calcule la expresión de  $k_C$  y de  $V_{TC}$  en función de  $k$ ,  $V_T$ ,  $V_\gamma$  y  $\beta$  (1,5 p)

b) Si el BJT se satura, o el MOSFET entra en región gradual, el transistor compuesto también sale de su región activa de funcionamiento. Diga cuál es la mínima tensión de drenador a fuente  $v_{DSC}$  para la que el transistor está en región activa si  $V_T = 1$  V,  $V_{CE(sat)} = 0,2$  V,  $V_\gamma = 0,6$  V y  $v_{GSC} = 2$  V (estos datos son para utilizar exclusivamente en esta pregunta) (1,0 p)

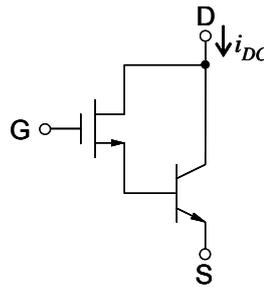


Figura 5

SOLUCIÓN EJERCICIO 3

a)  $i_B, i_C, v_{BE}, \beta$  corresponden al transistor bipolar,  $v_{GS}, i_D, k, V_T$  al MOSFET, y  $v_{GSC}, i_{DC}, k_C, V_{TC}$  al transistor compuesto:

$$v_{GSC} = v_{GS} + v_{BE}; v_{DSC} = v_{CE} = v_{DS} + v_{BE}$$

$$i_{DC} = i_C + i_D = (\beta + 1)k(v_{GS} - V_T)^2 = (\beta + 1)k(v_{GSC} - V_\gamma - V_T)^2$$

$$V_{TC} = V_T + V_\gamma; \quad k_C = (\beta + 1)k$$

b) Las dos condiciones siguientes expresan que ni el MOSFET ni el BJT salen de su región activa de funcionamiento:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_T \Rightarrow v_{DSC} - v_{BE} \geq v_{GSC} - v_{BE} - V_T \Rightarrow v_{DSC} \geq v_{GSC} - V_T = 1 \text{ V}$$

$$v_{CE} \geq V_{CE(sat)} \Rightarrow v_{DSC} \geq V_{CE(sat)} = 0,2 \text{ V}$$

La más restrictiva es la primera: el transistor está en activa directa si  $v_{DSC} \geq 1$  V

**Ejercicio 4.** En el amplificador diferencial de la Figura 6,

- calcule el valor mínimo de la señal de entrada  $v_1$  para que la caída de tensión en la fuente de corriente  $v_G$  (definida tal como aparece en la figura) sea menor de 1 V (1,3 p.)
- calcule el valor máximo de la señal de entrada  $v_1$  para que los transistores no estén saturados (1,2 p.)

DATOS:  $V_{CC} = 10$  V,  $R_C = 0,8$  k $\Omega$ ;  $I_G = 1$  mA

Transistores iguales:  $V_{\gamma E} = 0.6$  V;  $\beta = 100$ ;  $V_{CEsat} = 0.2$  V

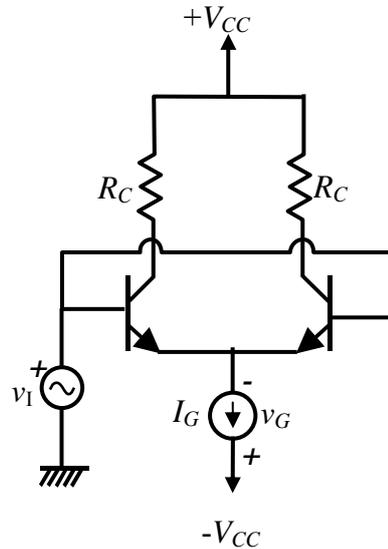


Figura 6

#### SOLUCIÓN EJERCICIO 4

- Si la tensión en la fuente de corriente  $v_G$  debe ser menor que 1V,  $\Rightarrow v_G = -V_{CC} - v_E < 1V$ . La tensión en los emisores es  $v_E = v_1 - V_{\gamma E}$  resulta que:  
 $v_1 > V_{\gamma E} - V_{CC} - 1$  V = -10,4 V.
- En modo común la corriente por los colectores de los 2 transistores es la misma,  $I_{C1} = I_{C2} \approx I_G/2 = 0.5$  mA.  
 En el límite saturación-activa la tensión  $v_{CE} = V_{CEsat}$  y por tanto  $v_1 = V_{CC} - R_C I_G/2 - V_{CEsat} + V_{\gamma E} = 10$  V, es decir para que los transistores no estén en saturación,  $v_1 < 10$  V.

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

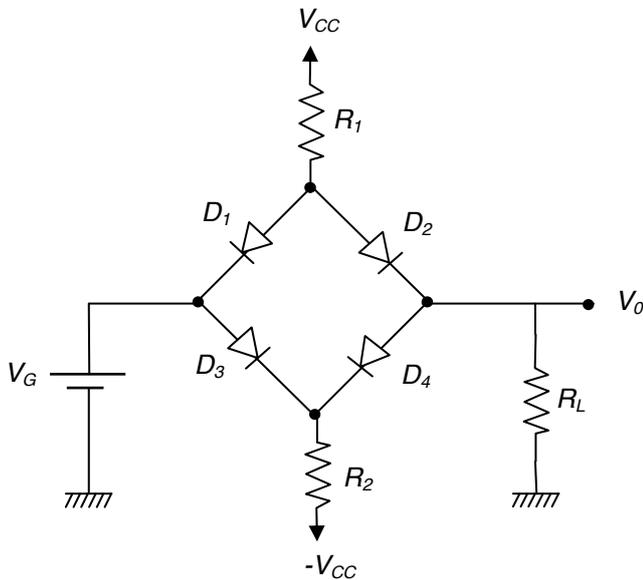
<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2'5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha prevista Publicación de Calificaciones: 26/02/07**
  - ⇒ **Fecha prevista Revisión: 1/03/07, a las 12:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes)**
-

**Ejercicio 1.** En el circuito de la figura 1 los cuatro diodos,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  y  $D_4$  son iguales. El generador  $V_G$  es de tensión continua.

- Para  $V_G = 0$  V, diga, razonando la respuesta, en qué estado se encuentra cada uno de los diodos. Calcule la corriente por las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_L$ . (1 p)
- Para  $V_G = 7$  V demuestre que los diodos  $D_1$  y  $D_4$  están en OFF. Calcule el valor de la tensión de salida,  $V_0$  y la corriente por la resistencia  $R_L$ . (1 p)
- Para  $V_G = -7$  V explique cuál será el estado de cada uno de los diodos. (0,5 p)



DATOS:  $V_{CC}=10$  V;  $R_1=R_2=R_L= 10$  k $\Omega$ . Para los diodos utilice un modelo lineal por tramos con  $V_\gamma = 0.7$  V.

Figura 1

### SOLUCIÓN EJERCICIO 1

a) Suponemos que los cuatro diodos están en ON, por lo que la tensión en cada uno de ellos vale  $V_\gamma$ . En ese caso, siendo  $V_G=0$ , la tensión de salida será:

$$V_0 = V_G + V_\gamma - V_\gamma = 0 \text{ V, y por tanto } I_{RL} = 0.$$

$$I_{R1} = (V_{CC} - V_\gamma) / R_1 = 0,93 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = (-V_\gamma + V_{CC}) / R_2 = 0,93 \text{ mA}$$

Como el circuito es simétrico:

$$I_{D1} = I_{D2} = 0,465 \text{ mA}$$

Por otro lado:

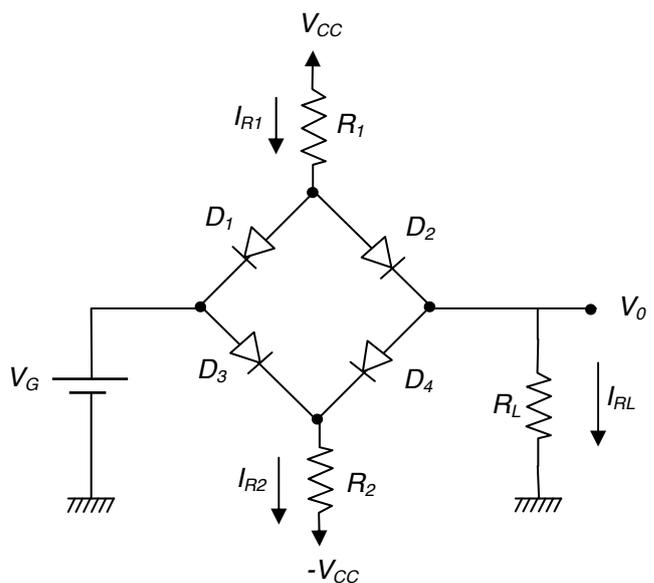
$$I_{D3} = I_{D1} = 0,465 \text{ mA}$$

$$I_{D4} = I_{D2} = 0,465 \text{ mA}$$

La corriente de cada diodo es positiva, como corresponde a la hipótesis de estado ON.

b) Suponemos que los diodos  $D_1$  y  $D_4$  están en OFF, como dice el enunciado, y que los diodos  $D_2$  y  $D_3$  están en ON. Por tanto, las corrientes por los diodos  $D_1$  y  $D_4$  serán  $I_{D1} = I_{D4} = 0$ .

En ese caso:



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---

$$I_{R2} = (V_G - V_\gamma + V_{CC}) / R_2 = I_{D3} = 1,63 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = I_{R1} R_1 + V_\gamma + I_{RL} R_L$$

$$I_{R1} = I_{D2} = I_{RL} = (V_{CC} - V_\gamma) / (R_1 + R_L) = 0,465 \text{ mA}$$

$$V_0 = I_{RL} R_L = 4,65 \text{ V}$$

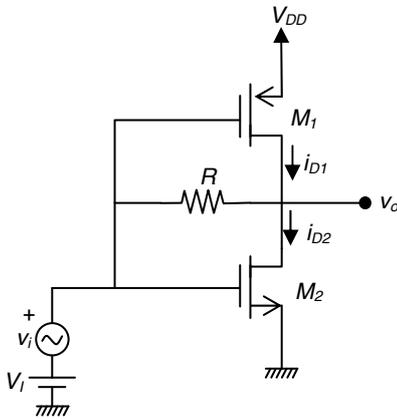
La tensión en el diodo  $D_4$  será:  $V_{D4} = V_0 - (V_G - V_\gamma) = -1,65 \text{ V}$ . Por tanto el diodo  $D_4$  está en OFF.

La tensión en el diodo  $D_1$  será:  $V_{D1} = V_0 + V_\gamma - V_G = -1,65 \text{ V}$ . Por tanto el diodo  $D_3$  está en OFF.

c) En este caso, por la simetría del circuito los diodos  $D_1$  y  $D_4$  estarían en ON y los diodos  $D_2$  y  $D_3$  en OFF.

**Ejercicio 2.** El circuito de la Figura 1 representa un amplificador CMOS. Los dos transistores  $M_1$  y  $M_2$  son normal OFF. Se pide:

- a) Calcular  $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$  y  $V_0$  (en continua) y los parámetros del circuito equivalente en pequeña señal,  $g_m$  y  $r_o$ , para cada transistor. Compruebe que ambos transistores trabajan en activa. Para el análisis de polarización tome  $V_A \rightarrow \infty$ , pero no use esta aproximación para ningún otro cálculo. (1p)
- b) Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal y calcular la ganancia de tensión,  $A_V = v_o/v_i$ . (1,5 p)



DATOS

$$V_{DD}=5 \text{ V}; V_I=2,5\text{V}; R=312,5 \text{ k}\Omega$$

$$k_1 = k_2 = k = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ A/V}^2; V_{T1} = V_{T2} = V_T = 0,5 \text{ V}; V_A = 100\text{V};$$

Figura 1

SOLUCIÓN EJERCICIO 2

a) Analizando el circuito se obtiene:

$$I_{D1} = k(V_{SG1} - V_T)^2 = k(V_{DD} - V_I - V_T)^2 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

$$I_{D2} = k(V_{GS2} - V_T)^2 = k(V_I - V_T)^2 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

$$\text{Como } I_{D1} = I_{D2}, \text{ entonces } I_R = 0 \Rightarrow V_0 = V_I$$

$$g_{m1} = 2k(V_{SG1} - V_T) = 2k(V_{DD} - V_I - V_T) = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ mhos}$$

$$g_{m2} = 2k(V_{GS2} - V_T) = 2k(V_I - V_T) = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ mhos}$$

$$r_{o1} = V_A / I_{D1} = 312,5 \text{ k}\Omega$$

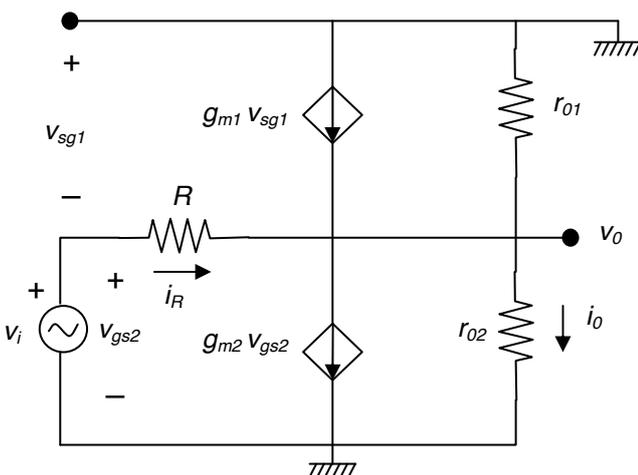
$$r_{o2} = V_A / I_{D2} = 312,5 \text{ k}\Omega$$

Comprobación de estado de los transistores:

Para  $M_1$  se obtiene que:  $V_{SG1} = V_{DD} - V_I = 2,5\text{V} > V_T = 0,5\text{V}$ ; y además  $V_{SD1} = V_{DD} - V_0 = 2,5\text{V} > V_{SD1,sat} = V_{SG1} - V_T = 2\text{V}$ ; por tanto está en activa.

Para  $M_2$  se obtiene que:  $V_{GS2} = V_I = 2,5\text{V} > V_T = 0,5\text{V}$ ; y además  $V_{DS2} = V_0 = 2,5\text{V} > V_{DS2,sat} = V_{GS2} - V_T = 2\text{V}$ ; por tanto está en activa.

b)



Analizando por nudos se obtiene:

$$v_o \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r_{o1}} + \frac{1}{r_{o2}} \right) - \frac{v_i}{R} = g_{m1} v_{sg1} - g_{m2} v_{gs2}$$

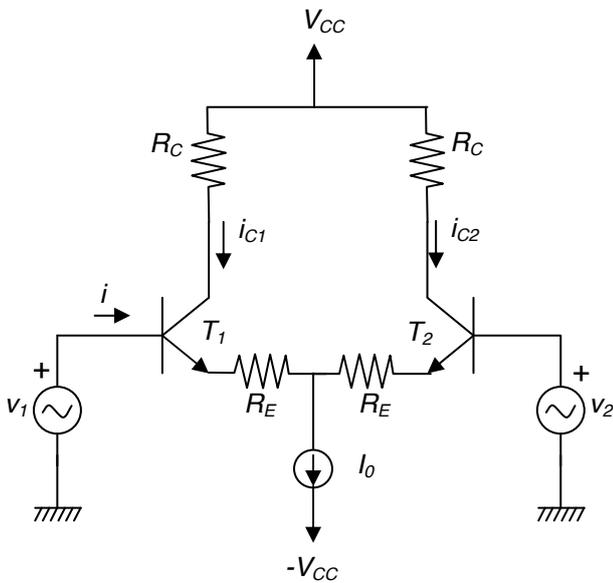
$$v_{sg1} = -v_i$$

$$v_{gs2} = v_i$$

$$\text{De donde se obtiene: } \frac{v_o}{v_i} = \frac{\frac{1}{R} - g_{m1} - g_{m2}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_{o1}} + \frac{1}{r_{o2}}} = -66,6$$

**Ejercicio 3.** El circuito convertidor tensión-corriente de la Figura 1 está formado por un par diferencial con dos transistores idénticos que trabajan en activa. Se pide:

- a) Calcular las corrientes de los colectores  $I_{C1}$  e  $I_{C2}$  en continua y los parámetros  $r_{\pi 1}$  y  $r_{\pi 2}$  del modelo equivalente para pequeña señal de los transistores  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente. **(0,5p)**
- b) Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal del circuito completo (no utilice el teorema de Bartlett). **(1p)**
- c) Sobre el circuito anterior, calcular la resistencia de entrada del circuito en modo diferencial,  $r_{in} = v_d / i = (v_1 - v_2) / i$ , es decir cuando la señal alterna en modo común  $v_c = 0$ . **(1p)**



DATOS:

$V_{CC} = 10V$ ;  $I_0 = 1mA$ ;  $R_E = 5k\Omega$

Transistor:

$\beta = 100$ ;  $V_T = 25mV$

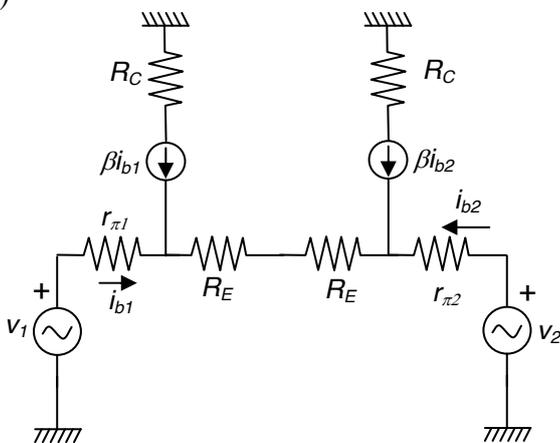
Figura 1

**SOLUCIÓN EJERCICIO 3**

a) Siendo un amplificador diferencial simétrico,  $I_{C1} = I_{C2} = I_0/2 = 0,5 \text{ mA}$

Por tanto:  $r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = V_T \beta / I_C = 5k\Omega$

b)



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

c) Analizando el circuito (modo diferencial) se obtiene:

$$i_{b1} = -i_{b2} = i$$

$$v_1 = r_{\pi 1} i_{b1} + 2R_E i_{b1}(\beta + 1) + r_{\pi 2} i_{b1} + v_2$$

Despejando:  $R_{in} = v_d/i = (v_1 - v_2)/i = r_{\pi 1} + 2R_E(\beta + 1) + r_{\pi 2} \cong 1 \text{ M}\Omega$

**Ejercicio 4.** El circuito de la Figura 1 se utiliza para aplicaciones de comunicaciones ópticas. El transistor trabaja conmutando y con ello se modula el diodo emisor de luz ( $D_{LED}$ ) en ON (encendido) –OFF (apagado). La señal que se aplica al circuito es la de la figura 2. Se pide:

- Para  $t < 0$ , diga el estado en el que se encuentran los diodos  $D_1$  y  $D_{LED}$  y el transistor. Calcule la corriente de colector del transistor,  $i_C$ , la corriente a través del diodo,  $i_{LED}$ , y la tensión en bornas del condensador  $v_0$ . **(0,9p)**
- Para  $t \rightarrow \infty$ , diga el estado en el que se encuentran los diodos  $D_1$  y  $D_{LED}$  y el transistor. Calcule la corriente de colector del transistor,  $i_C$ , la corriente a través del diodo,  $i_{LED}$ , y la tensión en bornas del condensador  $v_0$ . **(0,9p)**
- Calcule la variación de la tensión en el condensador para  $t > 0$ ,  $v_0(t)$ . **(0,7p)**

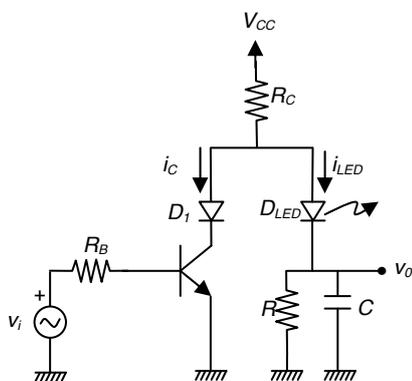


Figura 1

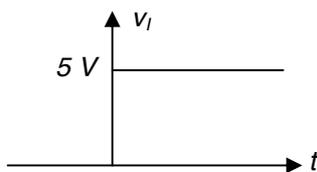


Figura 2

DATOS:

$V_{CC} = 5V$ ;  $R_C = 2k\Omega$ ;  $R_B = 500\Omega$ ;  $R = 1,8k\Omega$ ;  $C = 10nF$

DIODO  $D_1$ : Modelo lineal por tramos con  $V_{\gamma I} = 0,7V$

DIODO LED: Modelo lineal por tramos con  $V_{\gamma LED} = 1,2V$

TRANSISTOR BIPOLAR:  
 $V_{\gamma E} = 0,7V$ ;  $V_{CE,sat} = 0,2V$ ;  $\beta = 100$

### SOLUCIÓN EJERCICIO 4

a) Para  $t < 0$ ,  $v_I = 0$ . Por tanto  $V_{BE} = 0$ . El transistor está en corte. Entonces  $i_C = I_C = 0$  y el diodo  $D_1$  está en OFF, ya que por él no circula corriente.

Hipótesis: el diodo LED está en ON. Analizando la rama del LED y teniendo en cuenta que el condensador se comporta como un circuito abierto, se obtiene:

$V_{CC} = (R_C + R)i_{LED} + V_{\gamma LED}$ , de donde se obtiene:  $i_{LED} = I_{LED} = 1mA > 0$ , lo que confirma la hipótesis.

La tensión en bornas del condensador será:  $v_0 = V_0 = R \cdot I_{LED} = 1,8V$ .

b) Para  $t > 0$ ,  $v_I = 5V$ . Hipótesis: el transistor está en saturación, el diodo  $D_1$  está en ON y el LED en OFF.

$V_{BE} = 0,7V$ ;  $V_{CE} = V_{CE,sat} = 0,2V$ ;  $V_{D1} = V_{\gamma I} = 0,7V$

Analizando la rama del colector del transistor se obtiene:

$V_{CC} = R_C i_C + V_{\gamma I} + V_{CE,sat}$ , de donde se obtiene:  $i_C = I_C = 2,05mA > 0$ , lo que confirma la hipótesis de  $D_1$  en ON

Por otro lado:  $v_I = R_B i_B + V_{BE}$ , de donde se obtiene:  $i_B = I_B = 8,6mA$

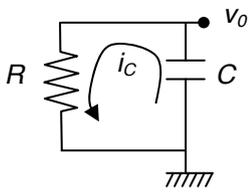
Se comprueba la hipótesis de transistor en saturación, ya que  $I_C < \beta I_B$

Si el LED está en OFF,  $i_{LED} = 0$ . Por tanto:  $v_{LED} + i_{LED} \cdot R = V_{CE} + V_{D1} \Rightarrow v_{LED} = V_{LED} = 0,2 + 0,7 = 0,9V < V_{\gamma LED}$ , lo que confirma la hipótesis de LED en OFF.

La tensión en bornas del condensador será:  $v_0 = R \cdot I_{LED} = 0V$ .

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

- c) Para  $t > 0$ , la corriente por el LED es cero. El condensador, que en  $t = 0^+$  está a 1,8 V, se descargará a través de la resistencia  $R$ .



$$R \cdot i_C = v_0; \text{ por tanto } R \cdot C \frac{dv_0}{dt} + v_0 = 0$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se obtiene:  $v_0(t) = A \cdot e^{-t/RC}$

Aplicando la condición inicial de  $v_0(t=0) = 1,8\text{V}$  se obtiene:  $A = 1,8\text{V}$ .

$$\text{Por tanto: } v_0(t) = 1,8 \cdot e^{-t/RC} \text{ V}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2'5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha prevista Publicación de Calificaciones: 21/02/07**
  - ⇒ **Fecha prevista Revisión: 28/02/07, a las 12:00 a.m. (Admisión de solicitudes hasta una hora antes)**
-

**Ejercicio 1.** En el circuito de la figura 1.1 los dos diodos,  $D_1$  y  $D_2$ , tienen la misma curva  $i$ - $v$  (representada en la figura 1.2). Calcule la expresión de  $v_L$  en función de  $v_I$ , para  $v_I \geq 0$ , en los siguientes casos:

- Cuando sea válida la hipótesis de que los dos diodos están cortados. **(0,7 p)**
- Cuando sea válida la hipótesis de que un diodo conduce y el otro no. **(0,7 p)**
- Cuando sea válida la hipótesis de que ambos diodos conducen. **(0,7 p)**
- Dibuje la función de transferencia  $v_L$  en función de  $v_I$ . **(0,4 p)**

DATOS:  $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$ ;  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ ;  $R_G = 6 \text{ k}\Omega$ .

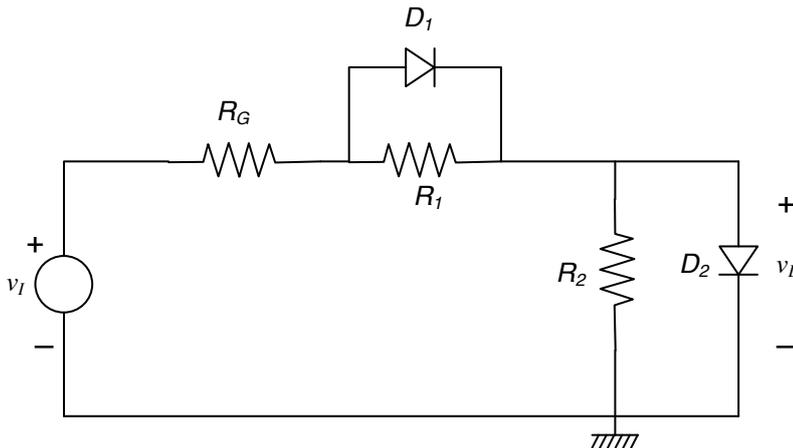


Figura 1.1

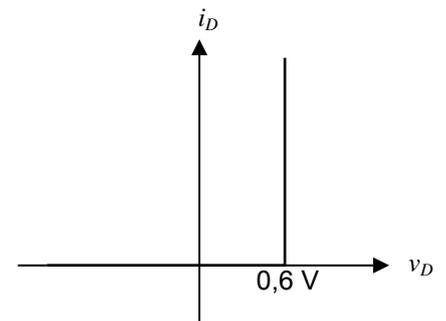
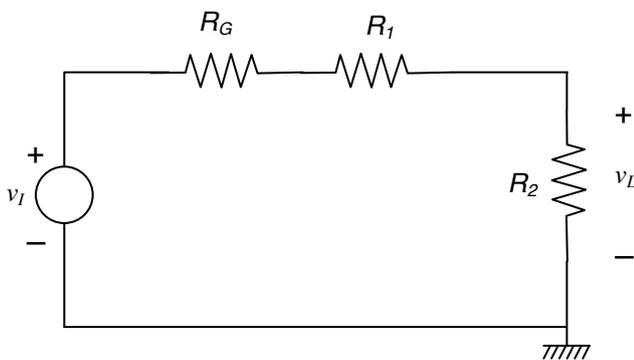


Figura 1.2

SOLUCIÓN EJERCICIO 1

a) Hipótesis:  $D_1$  y  $D_2$  cortados. No circula corriente por los diodos. El circuito equivalente es:



$$v_L = v_I \frac{R_2}{R_G + R_1 + R_2} = \frac{v_I}{6}$$

Esta relación es válida sólo cuando  $v_{D1} < 0,6 \text{ V}$  y  $v_{D2} < 0,6 \text{ V}$ .

Es decir:

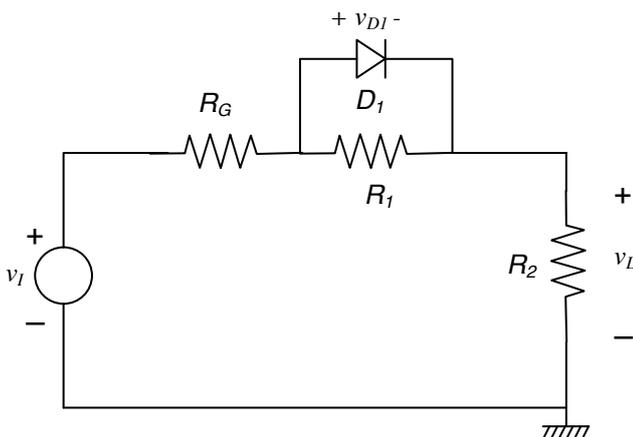
$$v_{D1} = v_{R1} = v_I \frac{R_1}{R_G + R_1 + R_2} < 0,6 \text{ V} \Rightarrow v_I < 1,8 \text{ V}$$

$$v_{D2} = v_{R2} = v_I \frac{R_2}{R_G + R_1 + R_2} < 0,6 \text{ V} \Rightarrow v_I < 3,6 \text{ V}$$

Por tanto  $D_1$  y  $D_2$  están cortados para  $0 < v_I < 1,8 \text{ V}$

b) Cuando  $v_I = 1,8 \text{ V}$ ,  $v_{D1} = 0,6 \text{ V}$  y  $v_{D2} = 0,3 \text{ V}$ . Por tanto el diodo  $D_1$  empezará a conducir antes que  $D_2$ .

Hipótesis:  $D_1$  conduce y  $D_2$  cortado. El circuito equivalente mientras  $D_1$  conduce y  $D_2$  permanece cortado es:



$$v_{D1} = v_{R1} = 0,6 \text{ V} \Rightarrow v_I \geq 1,8 \text{ V}$$

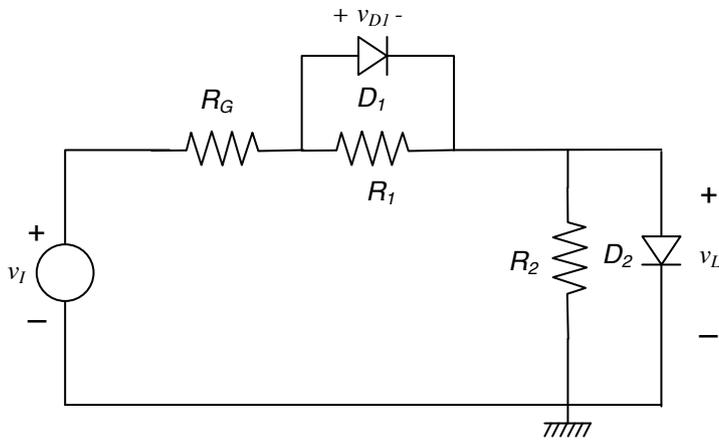
$$v_{D2} = v_{R2} = v_L = (v_I - v_{D1}) \frac{R_2}{R_G + R_2} = \frac{v_I - 0,6}{4}$$

La hipótesis se cumple cuando  $v_{D2} < 0,6 \text{ V} \Rightarrow v_I < 3 \text{ V}$ .

Por tanto, la hipótesis de  $D_1$  conduciendo y  $D_2$  cortado es válida para  $1,8 \leq v_I < 3 \text{ V}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

c) Hipótesis:  $D_1$  y  $D_2$  conducen. Para que  $D_2$  empiece a conducir, según el apartado anterior, debe cumplirse que  $v_I \geq 3V$ . En este caso el circuito equivalente es:

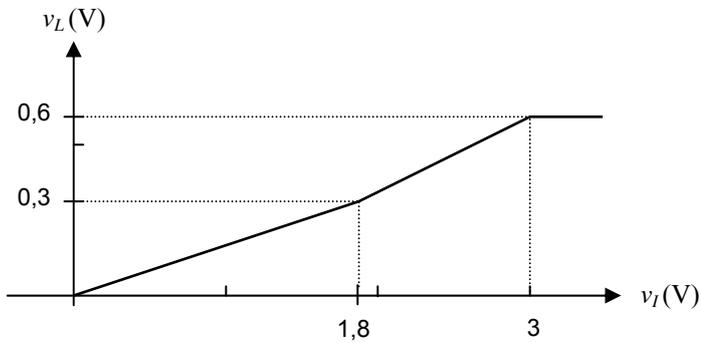


$$v_{D1} = 0,6V$$

$$v_{D2} = v_{R2} = v_L = 0,6V$$

d) La función de transferencia del circuito es:

$$v_L = \begin{cases} v_I / 6 & \text{para } 0 \leq v_I < 1,8 \text{ V (D}_1 \text{ y D}_2 \text{ cortados)} \\ (v_I - 0,6) / 4 & \text{para } 1,8 \text{ V} \leq v_I < 3 \text{ V (D}_1 \text{ conduce y D}_2 \text{ cortado)} \\ 0,6 \text{ V} & \text{para } v_I \geq 3 \text{ V (D}_1 \text{ y D}_2 \text{ conducen)} \end{cases}$$



**Ejercicio 2.** El circuito de la figura 2.1 representa un amplificador. Los dos transistores  $T_1$  y  $T_2$  trabajan en activa. Se le pide calcular:

- a) Los valores de continua  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $V_{CE1}$  y  $V_{CE2}$ . Para este análisis de polarización puede despreciar las corrientes de base de los transistores frente al resto de corrientes del circuito. **(0,7 p)**
- b) Los parámetros del circuito equivalente en pequeña señal para cada transistor,  $r_{\pi 1}$  y  $r_{\pi 2}$  y dibujar el circuito equivalente en pequeña señal. **(0,8 p)**
- c) La ganancia de tensión,  $A_V = v_o/v_i$ . **(1 p)**

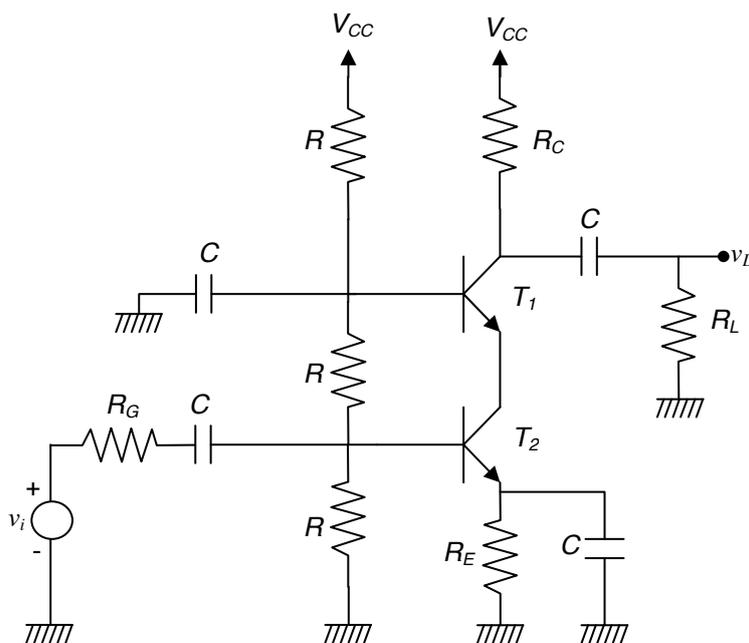


Figura 2.1

**DATOS**

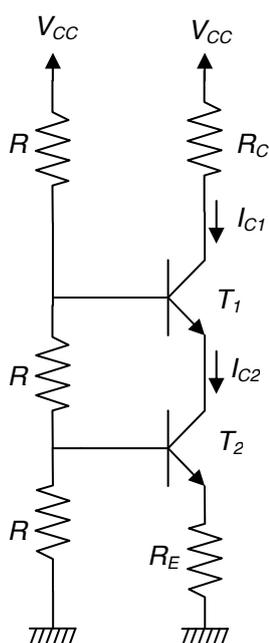
$V_{CC} = 12\text{ V}$ ;  $R = 4\text{ k}\Omega$ ;  
 $R_C = 2\text{ k}\Omega$ ;  $R_E = 3,3\text{ k}\Omega$ ;  
 $R_G = 2\text{ k}\Omega$ ;  $R_L = 2\text{ k}\Omega$  ;  
 $C \rightarrow \infty$ .

**T1 y T2:**

$\beta = 100$  ;  $V_{\gamma E} = 0,7\text{ V}$  ;  
 $V_t = 25\text{ mV}$ ;  $V_{CE,sat} = 0,2\text{ V}$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2**

a) En continua el circuito a analizar es el siguiente:



Despreciando las corrientes de base frente al resto de corrientes del circuito, resulta que la corriente a través de las tres resistencias  $R$  es la misma, y por tanto la tensión en cada una de ellas es de  $V_R = V_{CC}/3 = 4\text{ V}$ .

$$V_{CE2} = V_R - V_{BE1} + V_{BE2} = 4 - 0,7 + 0,7 = 4\text{ V}$$

La tensión en  $R_E$  será  $V_{RE} = V_{B2} - V_{\gamma E} = 4 - 0,7 = 3,3\text{ V}$

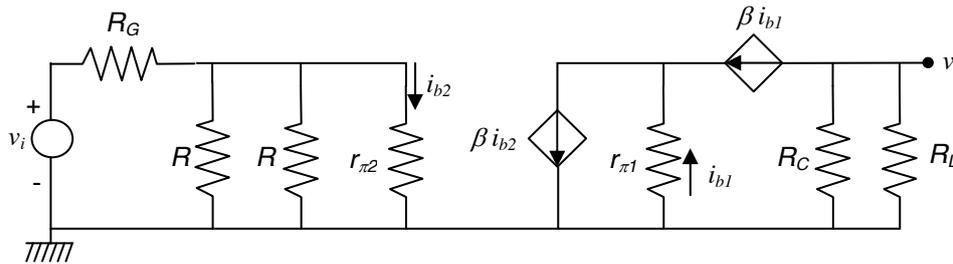
La corriente de emisor de T2 será:  $I_{E2} = V_{RE} / R_E = 1\text{ mA}$ .

Y por tanto:  $I_{C1} = I_{C2} = I_{E2} = 1\text{ mA}$ .

$$V_{CE1} = (V_{CC} - I_{C1} R_C) - (V_{RE} + V_{CE2}) = (12 - 2) - (3,3 + 4) = 2,7\text{ V}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

b) El circuito equivalente en pequeña señal es:



Donde:  $r_{\pi 1} = \beta V_t / I_{C1} = 2,5 \text{ k}\Omega$

$r_{\pi 2} = \beta V_t / I_{C2} = 2,5 \text{ k}\Omega$

c) Analizando el circuito anterior se obtiene:

$$v_l = -\beta i_{b1} (R_C // R_L)$$

$$\beta i_{b2} = (\beta + 1) i_{b1} \Rightarrow i_{b2} \cong i_{b1}$$

$$v_l = -\beta i_{b2} (R_C // R_L) = -\beta \frac{v_i}{R_G + (R // R // r_{\pi 2})} \frac{R // R}{(R // R) + r_{\pi 2}} (R_C // R_L)$$

$$\frac{v_l}{v_i} = -\beta \frac{1}{R_G + (R // R // r_{\pi 2})} \frac{R // R}{(R // R) + r_{\pi 2}} (R_C // R_L) = -14,3$$

**Ejercicio 3.** El circuito de la figura 3.1 es un amplificador diferencial realizado con dos MOSFET de acumulación de canal p que trabajan en saturación. Se pide:

- Calcular el valor de la tensión continua en el nudo de salida,  $V_L$ ,  $V_{SG1}$  y  $V_{SG2}$  cuando el amplificador funciona correctamente. Para este apartado no tenga en cuenta el efecto de modulación de la longitud de canal. **(0,5p)**
- Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal completo, y calcular el valor de los parámetros del circuito equivalente en pequeña señal,  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$ ,  $r_{o1}$  y  $r_{o2}$ . **(1p)**
- Aplicando el Teorema de Bartlett, calcular la ganancia de tensión en modo diferencial:  $A_{vd}=v_1/(v_1-v_2)$ . **(1p)**

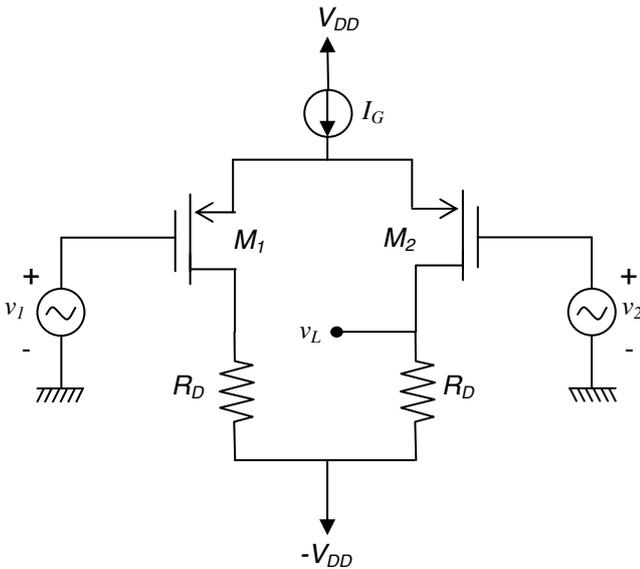


Figura 3.1

DATOS:

$V_{DD}=10V$ ;  $R_D=10k\Omega$ ; fuente de corriente ideal,  $I_G=1mA$ .

Transistores:

$V_A=50V$ ;  $\kappa=0,125 mA/V^2$ ;  $|V_T|=1V$

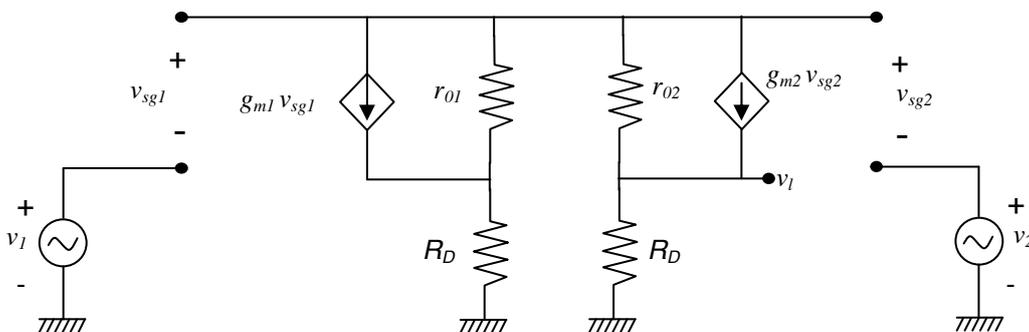
SOLUCIÓN EJERCICIO 3

a) Siendo un amplificador diferencial simétrico,  $I_{S1} = I_{S2} = I_G/2 = 0,5 mA$ .

Por tanto:  $V_L = -V_{DD} + R_D I_{S2} = -5V$ .

$$I_{D1} = I_{S1} = \kappa (V_{SG1} - V_T)^2 \Rightarrow V_{SG1} = 3V = V_{SG2}$$

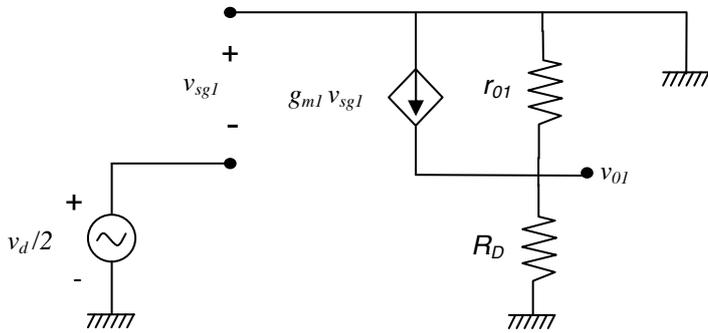
b) El circuito equivalente en pequeña señal es:



Donde  $r_{o1} = r_{o2} \cong V_A/I_{S1} = V_A/I_{S2} = 100k\Omega$  y  $g_{m1} = g_{m2} = 2\kappa(V_{SG1} - V_T) = 2\kappa(V_{SG2} - V_T) = 0,5 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$ .

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

c) Aplicando el teorema de Bartlett con entrada diferencial se debe analizar el siguiente circuito:



Analizando el circuito se obtiene:

$$v_{o1} = g_{m1} v_{sg1} (r_{o1} // R_D) = -g_{m1} (r_{o1} // R_D) v_d / 2$$

$$v_1 = v_{o2} = -v_{o1}$$

Por tanto:

$$A_{v_d} = v_1 / v_d = g_{m1} (r_{o1} // R_D) / 2 \cong 2,5$$

**Ejercicio 4.** El circuito de la figura 4.1 está formado por un transistor pnp. El generador de entrada suministra una señal como la mostrada en la figura 4.2. Se pide:

- a) Para  $t < 1s$ , diga el estado en el que se encuentra el transistor. Calcule el valor de la tensión a la salida,  $v_L(t)$ . **(0,9p)**
- b) Para  $t \rightarrow \infty$ , diga el estado en el que se encuentra el transistor y calcule el valor de la tensión a la salida,  $v_L(t)$ . **(0,9p)**
- c) Calcule la variación de la tensión en el condensador para  $t > 0$ ,  $v_L(t)$ . **(0,7p)**

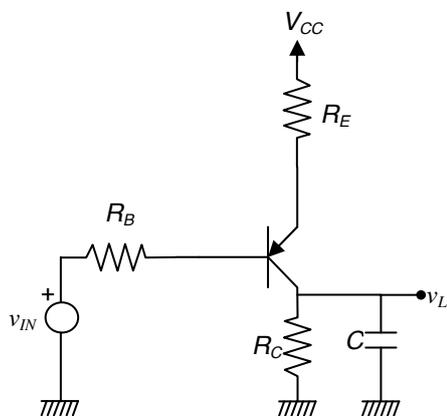


Figura 4.1

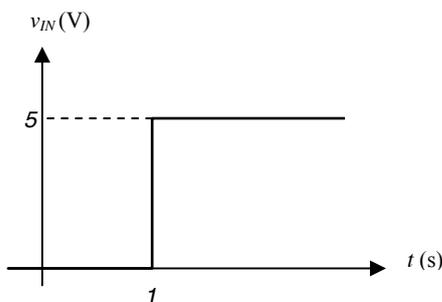


Figura 4.2

DATOS:

$$V_{CC} = 5V; R_C = 2,8k\Omega; R_B = 23k\Omega; R_E = 2k\Omega; C = 10nF$$

TRANSISTOR BIPOLAR:

$$V_{\gamma E} = 0,7V; V_{EC,sat} = 0,2V; \beta = 100$$

### SOLUCIÓN EJERCICIO 4

a) Para  $t < 0$ ,  $v_I = 0V$ . El condensador se comporta como un circuito abierto.

Hipótesis: transistor en saturación. Entonces  $v_{EC} = V_{EC,sat} = 0,2V$ .

Las ecuaciones de las mallas que pasan por EB y EC son:

$$V_{CC} = R_E i_E + V_{\gamma E} + R_B i_B = R_E (i_B + i_C) + V_{\gamma E} + R_B i_B$$

$$V_{CC} = R_E (i_B + i_C) + V_{EC,sat} + R_C i_C$$

Resolviendo, se obtiene  $i_B = 0,095 \text{ mA}$ ,  $i_C = 0,96 \text{ mA}$ . Se comprueba la saturación ya que  $i_B > 0$ ,  $i_C < \beta i_B$

$$v_L(t) = R_C i_C \cong 2,7 \text{ V.}$$

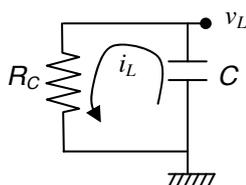
b) Para  $t \rightarrow \infty$ ,  $v_{IN} = 5V$ . El condensador se comporta como un abierto.

Hipótesis: transistor en corte. Entonces  $i_C = i_B = i_E = 0$ .

Por tanto  $v_E = V_{CC} = 5V$  y  $v_B = v_I = 5V \Rightarrow v_{EB} = 0 < V_{\gamma E}$ ,  $v_{CB} = -5 \text{ V}$ , lo que confirma la hipótesis de corte.

En este caso  $v_L(t) = R_C i_C = 0V$ .

c) Para  $t \geq 1s$  el transistor está en corte y  $i_C = 0$ . El circuito que se debe analizar para calcular  $v_L(t)$  es:



$$R_C \cdot i_L = v_L; \text{ por tanto } R_C \cdot C \frac{dv_L}{dt} + v_L = 0$$

Resolviendo esta ecuación diferencial se obtiene:  $v_L(t) = A \exp(-(t - 1)/R_C C)$

Aplicando la condición inicial de  $v_L(t = 1) = 2,8 \text{ V}$  se obtiene  $A = 2,8 \text{ V}$ .

Por tanto:  $v_L(t) = 2,8 \cdot \exp(-(t - 1)/R_C C)$ ; con  $t$  en s y  $v_L(t)$  en V.

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2'5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha prevista Publicación de Calificaciones Provisionales: 23/06/08**
  - ⇒ **Finalización del Plazo de Solicitud de Revisiones: 27/06/08**
  - ⇒ **Fecha Revisión de Examen: 30/06/08, a las 11:00 a.m.**
-

**Ejercicio 1.**

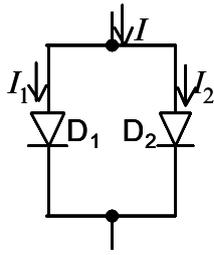


Figura 1.1

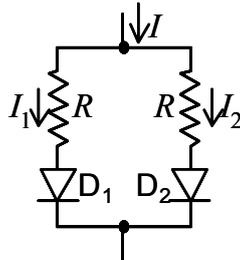


Figura 1.2

Debido a la dispersión inherente al proceso de fabricación, la corriente de saturación de los dos diodos de la Figura 1.1 puede ser diferente hasta en un factor diez. Se supone aquí que éste es el caso, de manera que  $I_{S1} = 10 \times I_{S2} = 10^{-14}$  A. Ambos diodos obedecen la ley ideal de Shockley y están a la misma temperatura.

- a) Calcule las corrientes que pasan por los diodos y las tensiones en sus terminales cuando están conectados como en la Figura 1.1. **(0,8 p.)**

Para determinada aplicación, la diferencia de corrientes resulta inaceptable y se pretende corregirla introduciendo resistencias en serie como se ve en la Figura 1.2.

- b) Calcule las tensiones en ambos diodos para que la diferencia entre las corrientes sea sólo del 10 %, es decir,  $I_1/I_2 = 1,1$  **(0,5 p.)**  
 c) Calcule el valor  $R$  de la resistencia que hay que introducir para conseguir la relación anterior. **(0,4 p.)**

Los diodos son LEDs que emiten una potencia luminosa proporcional a la corriente directa que circula por ellos, siendo la constante de proporcionalidad  $\gamma = 0,1$  mW/mA.

- d) Calcule la eficiencia energética de la emisión de luz ( $\eta \equiv \frac{\text{Potencia luminosa emitida}}{\text{Potencia eléctrica consumida}}$ ) en los dos circuitos. **(0,8 p.)**

DATOS:  $I = 1$  mA;  $V_t = 0,025$  V

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1**

a)

$$\left. \begin{aligned} I_1/I_2 = I_{S1}/I_{S2} = 10 \\ I_1 + I_2 = I = 1 \text{ mA} \end{aligned} \right\} I_1 \cong 0,91 \text{ mA}, I_2 \cong 0,091 \text{ mA}$$

$$V_1 = V_2 = V_t \ln \left( \frac{I}{I_{S1} + I_{S2}} + 1 \right) = 0,631 \text{ V}$$

b)

$$\left. \begin{aligned} I_1/I_2 = 1,1 \\ I_1 + I_2 = I = 1 \text{ mA} \end{aligned} \right\} I_1 \cong 0,524 \text{ mA}, I_2 \cong 0,476 \text{ mA}$$

$$V_1 = V_t \ln \left( \frac{I_1}{I_{S1}} + 1 \right) = 0,617 \text{ V}; V_2 = V_t \ln \left( \frac{I_2}{I_{S2}} + 1 \right) = 0,672 \text{ V}$$

c)

$$I_1 R + V_1 = I_2 R + V_2 \Rightarrow R = \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2} = 1,15 \text{ k}\Omega$$

d) La potencia eléctrica consumida es la corriente  $I$  por la tensión a la que se entrega, es decir,  $IV_1$  para el circuito de la Figura 1.1 e  $I(I_1 R + V_1)$  para el de la Figura 1.2. La potencia luminosa emitida es en ambos casos  $\gamma I$ . Entonces:

$$\eta_{\text{Figura 1}} = \frac{\gamma I}{V_1 I} = \frac{\gamma}{V_1} = \frac{0,1}{0,631} = 0,158$$

$$\eta_{\text{Figura 2}} = \frac{\gamma I}{(V_1 + I_1 R) I} = \frac{\gamma}{V_1 + I_1 R} = \frac{0,1}{1,22} = 0,082$$

**Ejercicio 2.** En el circuito de la Figura 2, cada uno de los transistores puede estar en tres estados (corte, activa o saturación) y se pueden modelar mediante el modelo lineal por tramos.

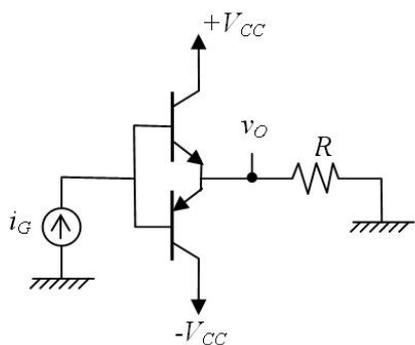


Figura 2

a) Puesto que hay dos transistores, existen 9 combinaciones de estados de los dos transistores. Indique de forma razonada cuales de estas nueve combinaciones NO se pueden dar en este circuito, y escriba "NO" en la casilla correspondiente (0,5 p.)

	npn corte	npn activa	npn sat.
npn corte			
npn activa			
npn satur.			

- b) Sólo para valores de  $i_G > 0$ : calcule la expresión de la función de transferencia  $v_O = f(i_G)$  y represéntela en un plano  $v_O - i_G$ . Para este cálculo no considere la posibilidad de que ambos transistores estén en corte. (1,5 p.)
- c) Sabiendo que  $v_O = f(i_G)$  es tal que  $f(-i_G) = -f(i_G)$  (simetría respecto al origen), dibuje la función de transferencia completa e indique en cada tramo de esta función el estado de cada uno de los dos BJT (corte, activa o saturación) (0,5 p.)

DATOS:  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ;  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ . Transistores  $V_{\gamma E} = 0,7 \text{ V}$ ;  $\beta = 99$ ;  $V_{CEsat} = V_{ECsat} = 0,2 \text{ V}$

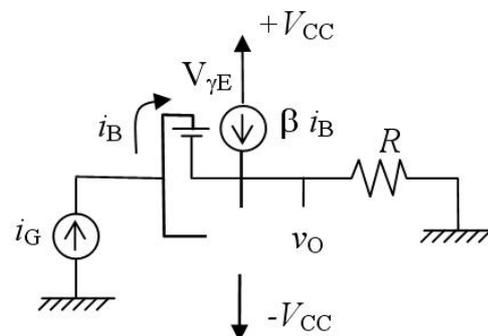
**SOLUCIÓN EJERCICIO 2**

(a) Las bases y los emisores de ambos transistores están conectadas entre sí de manera que no es posible que las uniones emisor-base de ambos transistores estén simultáneamente en directa. Por tanto no es posible que ambos transistores estén en activa o bien uno de ellos en activa y otro en saturación. Por tanto sólo hay 5 situaciones posibles: (i) npn en activa y pnp en corte, (ii) ambos en corte, (iii) npn en corte y pnp en activa, (iv) npn en saturación y pnp en corte y (v) npn en corte y pnp en saturación.

	npn cor.	npn act.	npn sat.
npn cor.			
npn act.		NO	NO
npn sat.		NO	NO

(b) Según dice el enunciado, sólo se deben considerar las combinaciones (i), (iii), (iv), y (v). La (iii) y la (v) exigen que la corriente  $i_G < 0$ , por lo que no se consideran.

(i) Hipótesis: npn en activa y pnp en corte. En ese caso el circuito queda



Cuya solución es  $v_O = (1 + \beta) R i_G$

Esta solución es válida si se cumplen las condiciones de la hipótesis es decir si

- 1)  $i_B > 0$ , (para el npn)
- 2)  $v_{CE} > V_{CEsat}$  (para el npn)
- 3)  $v_{EB} < V_{\gamma E}$  (para el pnp).

Estas condiciones implican:

- 1)  $i_G > 0$
- 2)  $V_{CC} - v_O > V_{CEsat}$
- 3)  $-V_{\gamma E} < V_{\gamma E}$ . Esta última condición siempre se cumple

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

(iv) Hipótesis: npn en saturación y pnp en corte.

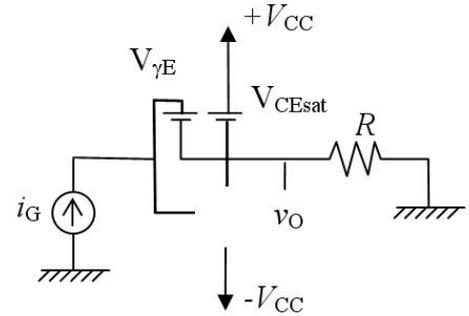
Por tanto  $v_O = V_{CC} - V_{CEsat}$

Esta solución es válida si se cumplen las condiciones de la hipótesis es decir si

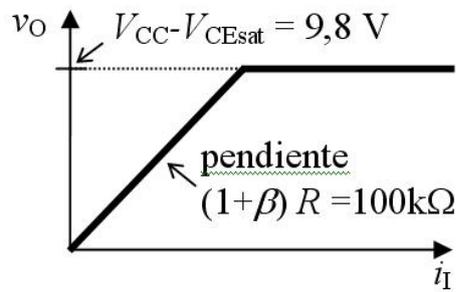
- 1)  $i_B > 0$ , (para el npn)
- 2)  $i_B \beta > i_C$ , (para el npn)
- 3)  $v_{EB} < V_{\gamma E}$  (para el pnp).

Estas condiciones implican:

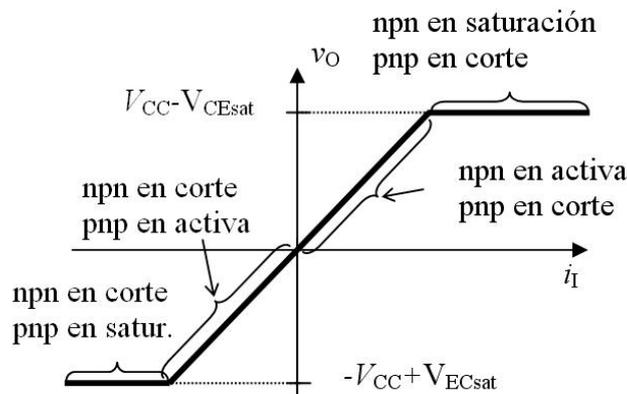
- 1)  $i_G > 0$
- 2)  $i_G \beta > v_O R - i_G$ , es decir  $v_O < (\beta + 1) i_G / R$
- 3)  $-V_{\gamma E} < V_{\gamma E}$ . Esta última condición siempre se cumple



Por tanto la gráfica queda:



(c)



**Ejercicio 3.** En la figura 3 el transistor Q1 forma parte de un amplificador de tensión con carga activa, formada por los transistores Q2 y Q3, que se pueden considerar idénticos y a la misma temperatura. Sabiendo que el circuito trabajará en frecuencias medias, se pide:

- Para el espejo de corriente formado por los transistores Q2 y Q3, calcule el valor de  $R$  para que  $I_0 = 2 \text{ mA}$ . En este apartado desprecie el efecto Early en los transistores **(0,4 p.)**
- Para el transistor Q1, calcule los valores de continua  $I_{D1}$  y  $V_{GS1}$ . Suponga en este apartado que el espejo de corriente colocado entre los puntos A y B funciona como una fuente de corriente ideal ( $R_{eq} \rightarrow \infty$ ) de valor  $I_0 = 2 \text{ mA}$  **(0,5 p.)**
- Dibuje el circuito equivalente en pequeña señal de todo el circuito (Q1, Q2 y Q3) y demuestre, razonadamente, que la impedancia equivalente del espejo de corriente vista desde el drenador de Q1 (punto A) es el parámetro de pequeña señal  $r_0$  del transistor Q2 **(0,8 p.)**
- Calcule la ganancia en tensión  $A_v = v_o/v_f$  para  $R_f = 100 \Omega$  y  $R_f = 0 \Omega$  **(0,8 p.)**

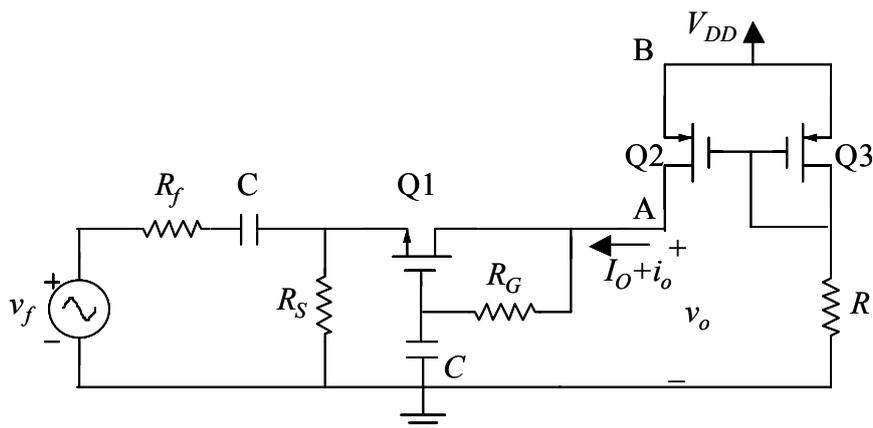


Figura 3

DATOS:

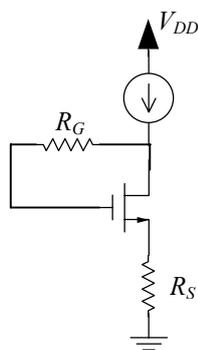
Q1: NMOS de acumulación (normalmente OFF)  
 $V_T = 1 \text{ V}$ ;  $\kappa = 1 \text{ mA/V}^2$ ;  $V_A \rightarrow \infty$

Q2, Q3: PMOS de acumulación (normalmente OFF)  
 $V_T = 4 \text{ V}$ ;  $\kappa = 1 \text{ mA/V}^2$ ;  $V_A = 50 \text{ V}$   
 $r_0 \approx V_A / I_D$

$R_G = 5 \text{ M}\Omega$ ;  $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ ;  $V_{DD} = 10 \text{ V}$ ;  $C \rightarrow \infty$

SOLUCIÓN EJERCICIO 3

- a) Como queremos que la corriente que sale del drenador de Q2 sea 2 mA, podemos calcular la tensión  $V_{GS2}$  resolviendo la ecuación:  $V_{GS2} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_0}{\kappa}}$ . La solución válida (para la cual Q2 está en saturación) es  $V_{GS2} = -5.41 \text{ V}$ . Como Q2 y Q3 son idénticos y tienen  $V_{GS2} = V_{GS3} = V_{GS}$ , la corriente  $I_0$  en el drenador de Q2 es la misma que la corriente en la resistencia R y vale  $I_0 = I_{ref} = \frac{V_{DD} + V_{GS}}{R}$ . Introduciendo el valor obtenido para  $V_{GS}$  obtenemos que  $R = 2,3 \text{ k}\Omega$ .



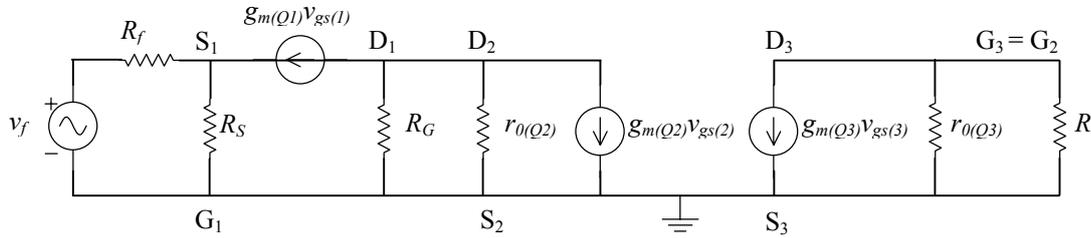
- b) El circuito de polarización queda:

Como por la puerta no circula corriente  $I_{D1} = I_0 = 2 \text{ mA}$  y  $V_{GS1} = V_{DS1}$

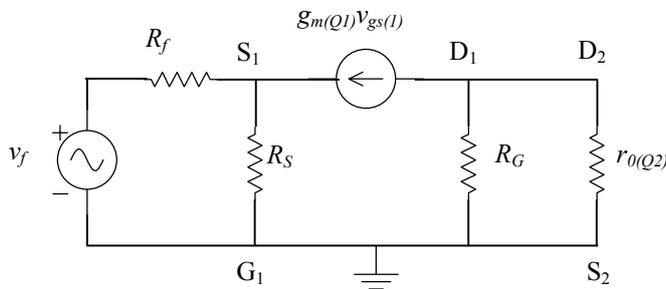
Para calcular  $V_{GS1}$  resolvemos:  $V_{GS1} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_0}{\kappa}}$ , la solución válida (para que Q1 esté en saturación) es  $V_{GS1} = 2,41 \text{ V}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

c) Circuito equivalente en pequeña señal:



Como la fuente de corriente asociada al transistor Q3 depende de la tensión en si misma tenemos que  $v_{gs2} = v_{gs3} = 0$ . De forma que el circuito se simplifica de la siguiente forma:



Del circuito se puede ver que la resistencia equivalente en pequeña señal del espejo de corriente visto desde el drenador de Q1 (D1) es  $r_{o(Q2)}$

d) Haciendo la suposición de  $r_{o(Q2)} \ll R_G$  sobre el circuito anterior, podemos plantear el siguiente sistema de 3 ecuaciones con 4 incógnitas, donde  $i_f$  es la corriente en la resistencia  $R_f$ .

$$v_0 = -g_m v_{gs1} r_{o(Q1)}$$

$$\frac{v_{gs1}}{R_S} + g_{m(Q1)} v_{gs1} + i_f = 0$$

$$v_f - (-v_{gs1}) = i_f R_f$$

De este sistema podemos sacar la relación entre  $v_0$  y  $v_f$ .

$$A_v = \frac{v_0}{v_f} = \frac{g_m r_{o(Q2)}}{g_m R_f + \left( \frac{R_f + R_S}{R_S} \right)} \approx \frac{g_m r_{o(Q2)}}{1 + g_m R_f}$$

Para  $R_f = 0 \Omega$  obtenemos  $A_v = 70$

Para  $R_f = 100 \Omega$  obtenemos  $A_v = 54,7$

**Ejercicio 4.** En el amplificador diferencial de la figura 4 se ha ajustado el valor de la corriente de polarización  $I_{PP}$  para conseguir que la ganancia en modo común sea nula. En esa situación y en ausencia de señal ( $v_{i1} = v_{i2} = 0$ ) se ha medido la tensión continua entre la base y el emisor  $V_{BE} = 630$  mV. Se pide que calcule:

- La corriente de drenador  $I_D$  del transistor MOST en continua (ausencia de señal) **(0,5 p.)**
- La corriente  $I_{PP}$  ajustada, es decir, la que hace que la tensión de pequeña señal de salida  $v_o$  sea nula cuando  $v_{i1} = v_{i2} = v_c$  (modo común) **(1 p.)**
- El cociente  $\beta v_m / v_d$  para  $v_{i1} = -v_{i2} = v_d / 2$  (modo diferencial), siendo  $v_m$  la tensión de pequeña señal del nodo M **(1 p.)**

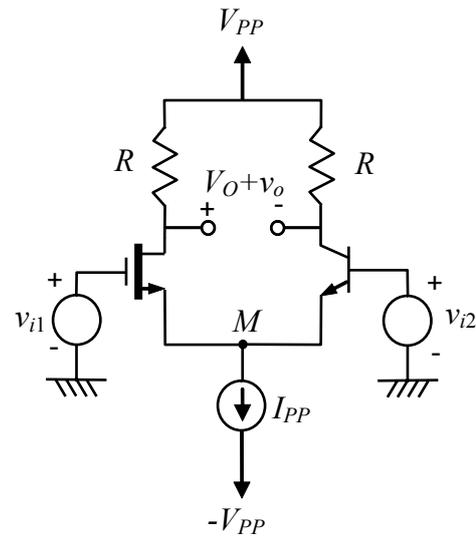


Figura 4

DATOS:

$$V_t = kT/e = 25 \text{ mV}$$

La fuente de corriente  $I_{PP}$  es ideal

$V_{PP} > 0$  y es lo suficientemente grande para que ambos transistores operen siempre en activa.

De los transistores:

$$\text{MOST: } i_D = \kappa (v_{GS} - V_T)^2; \kappa = 2 \text{ mA/V}^2; V_T = -0,37 \text{ V (es decir, MOST de depleción)}$$

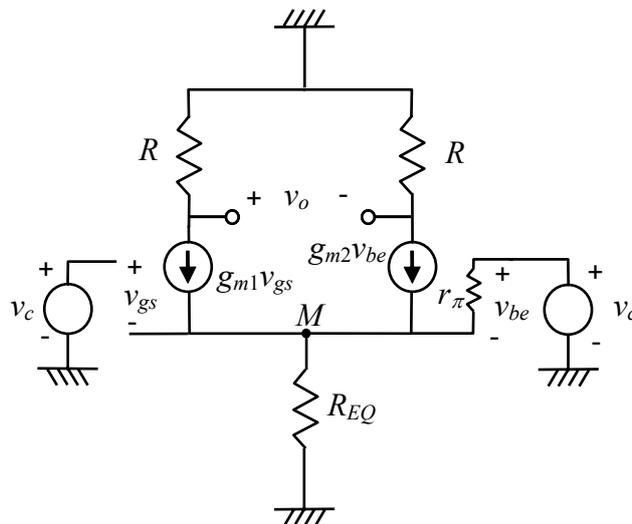
$$\text{BJT: } \beta = 100$$

NOTA: Los valores numéricos de  $R$  y  $V_{PP}$  no son necesarios para contestar las preguntas formuladas.

**SOLUCIÓN EJERCICIO 4**

a)  $I_D = \kappa (V_{GS} - V_T)^2 = \kappa (V_{BE} - V_T)^2 = 2 \text{ mA/V}^2 (0,63 \text{ V} - (-0,37 \text{ V}))^2 = 2 \text{ mA}$

b) Como el circuito no es simétrico, no se aplica el Teorema de Bartlett, sino que se trabaja con el circuito completo.



$v_o = 0 \Rightarrow R g_{m1} v_{gs} = R g_{m2} v_{be}$ . Como en modo común  $v_{gs} = v_c - v_m = v_{be}$ , se deduce que para el circuito anterior  $I_{PP}$  debe haberse ajustado para que:

$$g_{m1} = g_{m2}$$

Como:

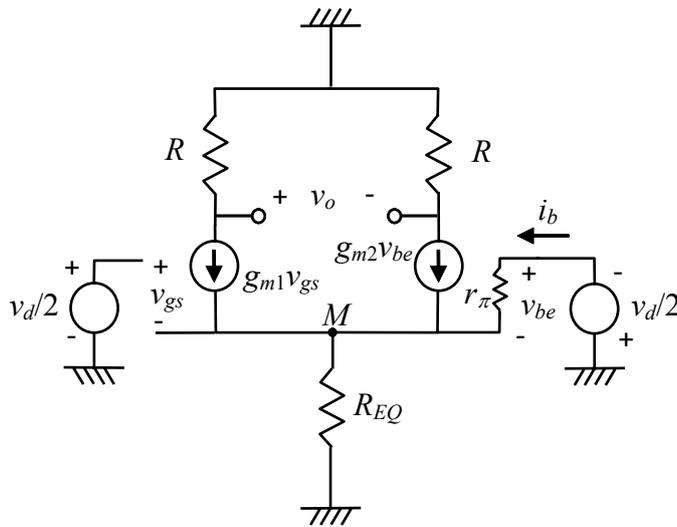
<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

$$\left. \begin{aligned} g_{m1} &= 2\kappa(V_{GS} - V_T) = 4 \text{ mS} \\ g_{m2} &= \frac{\beta}{r_\pi} = \frac{I_C}{V_t} \approx \frac{I_E}{V_t} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_E \approx V_t g_{m1} = 0,025 \text{ V} \times 4 \text{ mS} = 0,1 \text{ mA}$$

Por lo que:

$$I_{PP} = I_D + I_E = 2,1 \text{ A}$$

c) Como el circuito no es simétrico, no se aplica el Teorema de Bartlett, sino que se trabaja con el circuito completo.



Del nudo M, considerando que  $R_{EQ} \rightarrow \infty$ :

$$\left. \begin{aligned} g_{m1}v_{gs} + g_{m2}v_{be} &= -i_b \\ v_{be} &= r_\pi i_b \end{aligned} \right\}$$

Como  $g_{m1} = g_{m2} \equiv g_m$  y en modo diferencial  $v_{gs} = \frac{v_d}{2} - v_m$  y  $v_{be} = -\frac{v_d}{2} - v_m$  tenemos que:

$$-\frac{v_{be}}{r_\pi} = g_m (v_{gs} + v_{be}) \Rightarrow -\frac{v_d}{2} - v_m = 2r_\pi g_m v_m \Rightarrow \frac{\beta v_m}{v_d} = -\frac{\beta}{2(1+2r_\pi g_m)} = -\frac{\beta}{2(1+2\beta)} \approx -0,25$$

<b>APELLIDOS</b>				<b>CALIFICACIÓN</b>
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>		

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2,5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha prevista Publicación de Calificaciones Provisionales: 22 Septiembre 2008**
  - ⇒ **Finalización del Plazo de Solicitud de Revisiones: 23 Septiembre 2008**
  - ⇒ **Fecha Revisión de Examen: 25 Septiembre 2008**
-

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 1.** El componente de dos terminales de la Figura 1.1 contiene dos fotodiodos idénticos conectados en serie y en oposición. Cada uno de los fotodiodos puede caracterizarse tal como se indica en la Figura 1.2, es decir, por un diodo ideal en oscuridad en paralelo con una fuente de corriente  $I_L$  cuyo valor es proporcional a la potencia luminosa recibida por el fotodiodo. El objetivo de dicho componente es limitar el valor absoluto de la corriente que circula por la rama en la que esté intercalado. Su ecuación característica  $i=f(v)$  (ver Figura 1.1 para las definiciones de  $i$  y  $v$ ) puede expresarse como  $i=I_A \tanh[g(v)]$  donde  $I_A$  es una constante y  $\tanh$  es la función tangente hiperbólica. Se pide que calcule:

a)  $I_A$  (1,0 pto).

b) La expresión de la función  $g(v)$  (1,5 pto).

DATOS:  $I_L = 10 \mu A$ ,  $I_s = 1 \mu A$ ,  $V_t = 0,025 V$

La característica de diodo ideal en oscuridad es la ecuación de Shockley, es decir,  $i_D = I_s [\exp(v_D/V_t) - 1]$

La función tangente hiperbólica se puede poner como  $\tanh(x) = [\exp(x) - \exp(-x)] / [\exp(x) + \exp(-x)]$

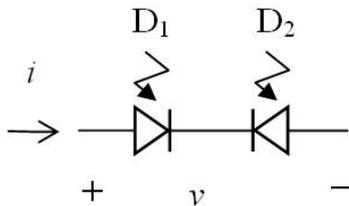


Figura 1.1

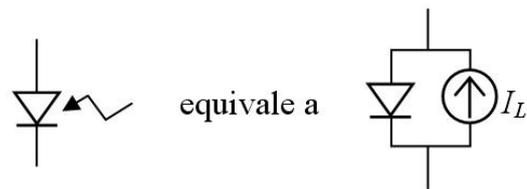
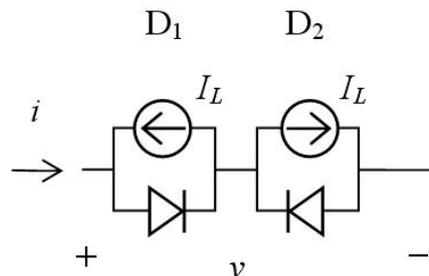


Figura 1.2

SOLUCIÓN EJERCICIO 1

a) La función tangente hiperbólica está limitada a los valores +1 y -1. Por tanto  $I_A$  es el valor absoluto de la corriente máxima que circula por el componente de la Figura 1.1. Dado que la tensión en un fotodiodo es una función creciente con la corriente se concluye que esa corriente máxima del componente de la Figura 1.1 se alcanza cuando  $v$  tiende a  $+\infty$ . En esa situación el fotodiodo  $D_2$  está con una tensión inversa que tiende a  $-\infty$  y por tanto la corriente que circula por él es la corriente inversa del diodo en oscuridad  $I_s$  más la corriente de iluminación  $I_L$ . En consecuencia  $I_A = I_s + I_L = 11 \mu A$

b) Substituyendo los fotodiodos por sus circuitos equivalentes con un diodo en oscuridad más una fuente de corriente, el componente de 2 terminales de la Figura 1.1 queda:



Si  $v_{D1}$  y  $v_{D2}$  son las tensiones en el fotodiodos (con el convenio habitual de signos, es decir, tensión del ánodo respecto del cátodo) se tiene que  $v = v_{D1} - v_{D2}$ . La corriente que circula por los fotodiodos es  $i$ . Por tanto:

$$i = I_s \left( \exp\left(\frac{v_{D1}}{V_t}\right) - 1 \right) - I_L = -I_s \left( \exp\left(\frac{v_{D2}}{V_t}\right) - 1 \right) + I_L$$

De donde se obtiene que  $\frac{v_{D1}}{V_t} = \ln\left(\frac{I_L + i}{I_s} + 1\right)$  y  $\frac{v_{D2}}{V_t} = \ln\left(\frac{I_L - i}{I_s} + 1\right)$ , lo que combinado con la primera expresión da

$\frac{v}{V_t} = \ln\left(\frac{I_L + i}{I_s} + 1\right) - \ln\left(\frac{I_L - i}{I_s} + 1\right)$ . Despejando  $i$  se obtiene  $i = (I_L + I_s) \tanh\left(\frac{v}{2V_t}\right)$ , por tanto la función  $g(v)$  es:

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

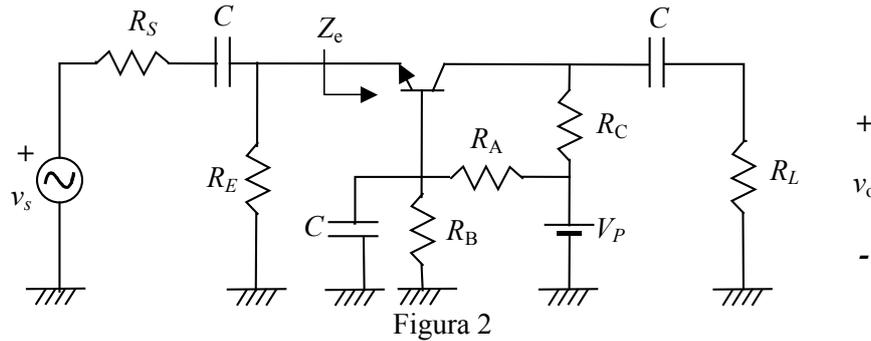
---

$$g(v) = \frac{v}{2V_t} = \frac{v}{50} \quad (v \text{ en mV})$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 2.** En el circuito de la Figura 2 haga las aproximaciones e hipótesis que considere oportunas, comprobándolas posteriormente, y calcule:

- a) La corriente de emisor en continua,  $I_E$ , indicando su sentido (0,7 pto); obtenga el modo de funcionamiento (o región de polarización) en que se encuentra el transistor (0,4 pto).
- b) La impedancia de entrada  $Z_e$  en pequeña señal y frecuencias medias (0,9 pto).
- c) La ganancia de tensión  $v_o/v_s$  en pequeña señal y frecuencias medias (0,5 pto).



Datos:  $R_S=50 \Omega$ ;  $R_A=1 \text{ k}\Omega$ ;  $R_B=2 \text{ k}\Omega$ ;  $R_E=9,3 \text{ k}\Omega$ ;  $R_C=4 \text{ k}\Omega$ ;  $R_L=750 \Omega$ ;  $V_P=15 \text{ V}$ ;  $V_t=0,025 \text{ V}$ ;  $C \rightarrow \infty$   
 Del transistor:  $V_{\gamma E} = 0,7 \text{ V}$ ;  $\beta = 100$ ;  $V_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$ ;  $V_A \rightarrow \infty$

**SOLUCIÓN EJERCICIO 2**

a) *Hipótesis:  $I_B$  pequeña frente a la corriente que circula por  $R_B$  y transistor en activa.*

$$V_B = V_P \frac{R_B}{R_B + R_A} = 10 \text{ V}; \quad V_E = V_B - V_{\gamma E} = 10 - 0,7 = 9,3 \text{ V};$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = 1 \text{ mA (saliente del transistor)}$$

*Comprobación:*

*Si el transistor está en activa:*

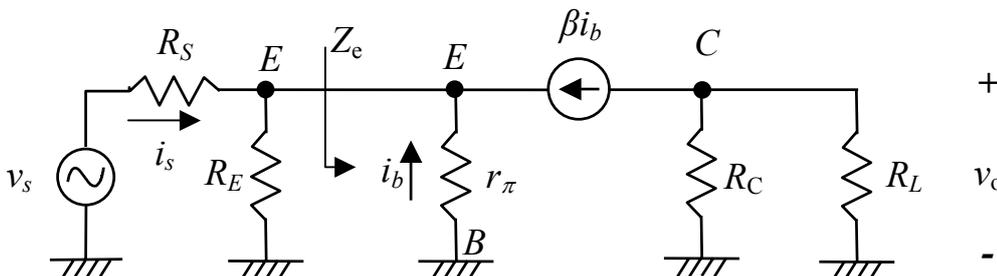
$$I_B \approx \frac{I_E}{\beta} = 0,01 \text{ mA mientras que } I_{RB} = \frac{V_P}{R_A + R_B} = 5 \text{ mA}$$

*Luego se cumple que  $I_B$  es pequeña frente a la corriente que circula por  $R_B$ , siempre que el transistor esté en activa. Para verificar esto, calculamos:*

$$I_C \approx I_E = 1 \text{ mA} \Rightarrow V_C = V_P - R_C I_C = 11 \text{ V} \Rightarrow V_{CE} = V_C - V_E = 11 - 9,3 = 1,7 \text{ V} > V_{CEsat}$$

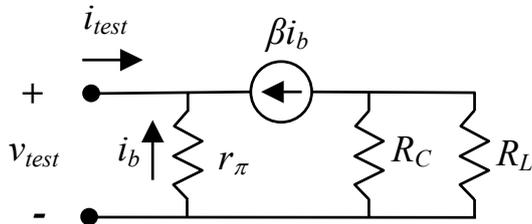
*Por tanto el transistor está en activa e  $I_B$  es suficientemente pequeña, por lo que el resultado hallado para  $I_E$  es válido.*

b) *El circuito de pequeña señal y frecuencias medias es:*



<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

Siendo  $r_\pi = \frac{V_t}{I_B} = 2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $r_o = V_A/I_C \rightarrow \infty$ . Para calcular  $Z_e$  se inyecta  $I_{test}$  y se mide  $V_{test}$ :



$$Z_e = \frac{v_{test}}{i_{test}} = \frac{r_\pi}{\beta + 1} \approx 25 \Omega$$

c) 
$$\left. \begin{aligned} v_s &= v_e + i_s R_s \\ i_s + (\beta + 1)i_b &= \frac{v_e}{R_E} \\ v_e &= -i_b r_\pi \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_s = -i_b \left[ \frac{r_\pi}{R_E} + (\beta + 1) \right] \Rightarrow v_s = -i_b r_\pi - i_b \left[ \frac{r_\pi}{R_E} + (\beta + 1) \right] R_s$$

$$v_o = -(R_C // R_L) \beta i_b$$

Por lo que 
$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{(R_C // R_L) \beta}{r_\pi + \left[ \frac{r_\pi}{R_E} + (\beta + 1) \right] R_s} \approx 8,3$$

3)

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 3.** El circuito de la Figura 3.1 utiliza un transistor JFET de canal n de deplexión (normal-ON) en estática. Para altas tensiones  $V_{DS}$ , la unión pn entre puerta y drenador de dicho transistor  $T_1$  entra en disrupción. La Figura 3.2 muestra la curva característica de salida en fuente común de  $T_1$  para  $V_{GS} = V_{GG}$ , en la que se observa que presenta un nuevo tramo vertical cuando  $V_{DS} = V_{DS,max}$ . Como consecuencia, en el circuito de la Figura 3.1 el transistor  $T_1$  puede operar en un nuevo estado (disrupción) dependiendo del valor de  $R$ . Este efecto puede modelarse utilizando como circuito equivalente de  $T_1$  el mostrado en la Figura 3.3, que consta de un transistor  $T_2$  ideal (es decir, sin disrupción) y un diodo Zener.

Se le pide que calcule:

- a) La tensión  $V_{DS,max}$  que se muestra en la Figura 3.2 (0,5 p).
- b) La corriente  $I_G$  para  $R = 5\text{ k}\Omega$ , sabiendo que  $T_1$  NO opera en gradual (1 p).
- c) La corriente  $I_G$  para  $R = 1\text{ k}\Omega$ , sabiendo que  $T_1$  NO opera en gradual (1 p).

DATOS:

$V_{DD} = 24\text{ V}$ ,  $V_{GG} = -2\text{ V}$

Tensión de disrupción del diodo Zener:  $|V_Z| = 10\text{ V}$

De  $T_2$ :  $\kappa = 1\text{ mA/V}^2$ ,  $V_T = -4\text{ V}$

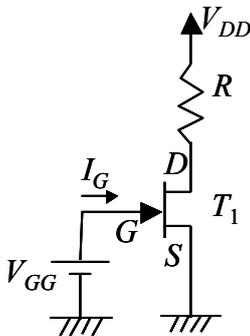


Figura 3.1

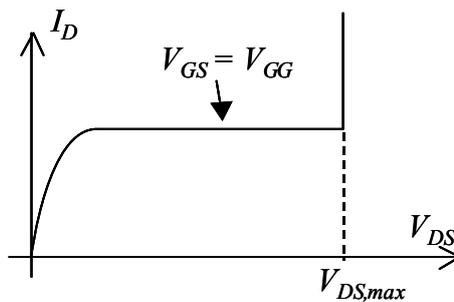


Figura 3.2

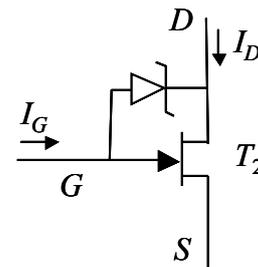


Figura 3.3

SOLUCIÓN EJERCICIO 3

a)  $V_{DS} = V_{GS} - V_{GD} = V_{GG} - V_{GD} \leq V_{GG} - (-|V_Z|) = -2\text{ V} + 10\text{ V} = 8\text{ V} = V_{DS,max}$

b) En primer lugar, independientemente del valor de  $R$ :

$I_G = I_{ZENER}$  (ya que  $I_{G2} = 0$ )

$I_D = I_{D2} - I_{ZENER}$

$I_S = I_G + I_D = I_{D2}$

Hipótesis:  $T_1$  en saturación (esto es,  $T_2$  saturación y Zener en OFF)

$I_G = I_{ZENER} = 0$

Comprobación de la hipótesis:

$I_D = I_{D2} - I_{ZENER} = I_{D2} = \kappa(V_{GS} - V_T)^2 = \kappa(V_{GG} - V_T)^2 = 4\text{ mA} \Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - RI_D = 4\text{ V} < 8\text{ V} = V_{DS,max}$

c)

Hipótesis:  $T_1$  en disrupción (esto es,  $T_2$  saturación y Zener en disrupción)

$V_{DS} = V_{DS,max} = 8 \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R} = 16\text{ mA}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

---

$$I_S = I_{D2} = \kappa(V_{GS} - V_T)^2 = 4 \text{ mA}$$

$$I_G = I_S - I_D = 4 \text{ mA} - 16 \text{ mA} = -12 \text{ mA}$$

*Comprobación de la hipótesis:*

$$I_{ZENER} = I_G = -12 \text{ mA} \leq 0$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

**Ejercicio 4.** El circuito diferencial de la Figura 4 maneja grandes señales y se usa como conmutador en aplicaciones digitales. Los transistores son idénticos, la fuente de corriente es ideal y se consideran despreciables los efectos capacitivos. Se pide:

- a) Suponiendo ambos transistores en activa, calcule las expresiones  $i_{E1}=f(v_{I1}+V_R)$  e  $i_{E2}=f(v_{I1}+V_R)$ . Para este apartado, use para los transistores el modelo de Ebers-Moll con los parámetros  $\alpha$  e  $I_{ES}$  **(0,8 p)**.

Para el análisis de los próximos apartados use el modelo lineal por tramos para los transistores, con  $V_{\gamma E}=0,7$  V,  $V_{CESat}=0,2$  V y  $\beta \gg 1$ .

- b) Para  $v_{I1} \gg -V_R$  indique el valor máximo de  $v_{I1}$  que asegura que los transistores no entran en saturación **(0,5 p)**.  
 c) Para  $v_{I1} = -0,7$  V, calcule el valor de la tensión de salida  $v_O$  **(0,6 p)**.  
 d) Para  $v_{I1} = -1,7$  V, calcule el valor de la tensión de salida  $v_O$  **(0,6 p)**.

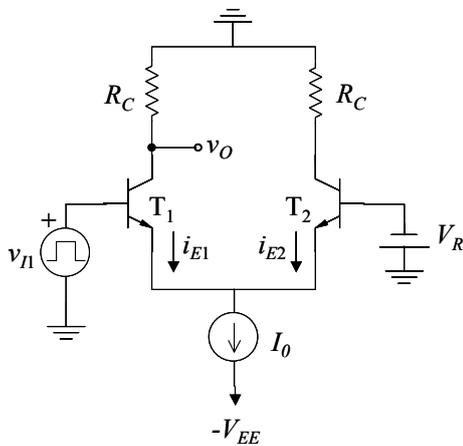


Figura 4

DATOS:

$$V_R = 1,3 \text{ V}; R_C = 0,25 \text{ k}\Omega; I_0 = 4 \text{ mA}$$

$$V_t = 0,025 \text{ V}$$

NOTA: Los valores numéricos de  $\alpha$ ,  $I_{ES}$  y  $V_{EE}$  no son necesarios para contestar las preguntas formuladas

SOLUCIÓN EJERCICIO 4

a) Siendo  $v_E$  la tensión en el emisor de los transistores

$$i_{E1} = I_{ES} \exp\left(\frac{v_{I1} - v_E}{V_t}\right) \quad \text{e} \quad i_{E2} = I_{ES} \exp\left(\frac{-V_R - v_E}{V_t}\right) \Rightarrow \frac{i_{E1}}{i_{E2}} = \exp\left(\frac{v_{I1} + V_R}{V_t}\right)$$

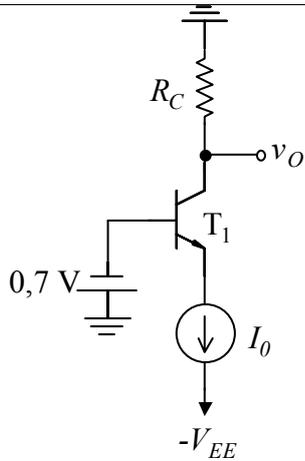
Además,  $i_{E1} + i_{E2} = I_0$ , luego

$$i_{E1} = \frac{I_0}{1 + \exp\left(-\frac{v_{I1} + V_R}{V_t}\right)} \quad ; \quad i_{E2} = \frac{I_0}{1 + \exp\left(\frac{v_{I1} + V_R}{V_t}\right)}$$

b) Para  $v_{I1} \gg -V_R$  tenemos  $i_{E1} \rightarrow I_0, i_{E2} \rightarrow 0$ , es decir  $T_1$  conduce y  $T_2$  está cortado.  $T_1$  seguirá en activa mientras  $v_{CE1} = -R_C I_0 - v_{I1} + V_{\gamma E} > V_{CESat} \Rightarrow v_{I1} < -R_C I_0 + V_{\gamma E} - V_{CESat} = -0,5$  V

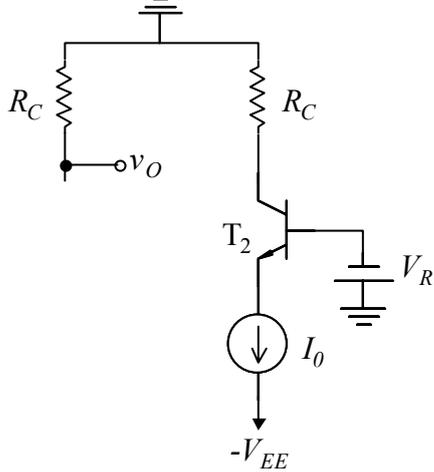
c) Al ser  $v_{I1} \gg -V_R, T_1$  conduce y  $T_2$  está cortado, y nos queda el circuito de la figura:

APELLIDOS			
NOMBRE		N° DNI	



Donde  $v_O = -R_C I_0 \frac{\beta}{\beta + 1} \approx -1 \text{ V}$

d) En este caso,  $v_{i1} \ll -V_R$ ,  $T_1$  está cortado y  $T_2$  conduce:



Donde  $v_O = 0 \text{ V}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

<b>CALIFICACIÓN</b>

**ANTES DE EMPEZAR lea atentamente estas INSTRUCCIONES**

- ⇒ Mantenga en lugar **VISIBLE** durante todo el examen un documento de **IDENTIFICACIÓN**
  - ⇒ Escriba, **DESDE ESTE MOMENTO**, sus datos personales (apellidos, nombre y DNI) **EN TODAS LAS HOJAS**, tanto de enunciados como para borradores, de que disponga.
  - ⇒ Las soluciones, en forma concisa pero completa, deben escribirse **EN ESTAS MISMAS HOJAS** de enunciados y **SÓLO** deben ocupar el **ESPACIO** correspondiente (entre el fin de cada enunciado y el comienzo del siguiente). La **ENTREGA DE TODAS** las hojas de enunciados es **OBLIGATORIA** aunque no haya escrito nada en alguna de ellas.
  - ⇒ Utilice para borradores **SÓLO** las hojas en blanco suministradas y **SÓLO** una vez identificadas con sus datos personales. Pero, al final, **NO ENTREGUE** hojas adicionales ni borradores. En ningún caso serían tenidas en cuenta.
  - ⇒ **NO SE PERMITE** el uso compartido de medios (calculadora, libros, etc). **NO SE PERMITE** la consulta de escritos en hojas sueltas.
  - ⇒ Dispone de un tiempo máximo de **3 HORAS** para la realización de este examen. Cada ejercicio vale **2'5 PUNTOS** (para un total de 10) y en cada apartado se especifica su puntuación parcial.
  - ⇒ **Fecha prevista Publicación de Calificaciones Provisionales: 20 Febrero 2009**
  - ⇒ **Finalización del Plazo de Solicitud de Revisiones: 23 Febrero 2009**
  - ⇒ **Fecha Revisión de Examen: 25 Febrero 2009**
-

**Ejercicio 1.** El circuito detector de impulsos de la figura 1.1 produce una indicación visible de los pulsos de corriente positivos y negativos. El circuito está formado por un divisor de resistencias conectado a un circuito rectificador compuesto por los diodos,  $D_1$  y  $D_2$ , y los LEDs  $D_3$  y  $D_4$ . El J-FET de canal n, en saturación, fija la corriente directa de los LEDs a un valor constante. Esto hace que la potencia luminosa emitida por los LEDs sea la misma para un rango de valores de la entrada de impulsos de corriente.

- Explique cualitativamente y de manera razonada el estado de los 4 diodos cuando la señal de entrada sea la mostrada en la figura 1.2. **(0,5 p)**
- Calcule el valor de la corriente directa de los LEDs cuando están en ON. **(0,5 p)**
- Calcule el mínimo valor de  $I_0$  necesario para que el circuito funcione con el J-FET en saturación. **(1,5 p)**

DATOS:  $R_1 = R_2 = 100 \Omega$ ;  $I_0 = 100 \text{ mA}$   
 Diodos: Modelo lineal por tramos con  $V_\gamma = 0,7 \text{ V}$   
 J-FET:  $\kappa = 0,625 \text{ mA/V}^2$ ;  $|V_T| = 4\text{V}$ .

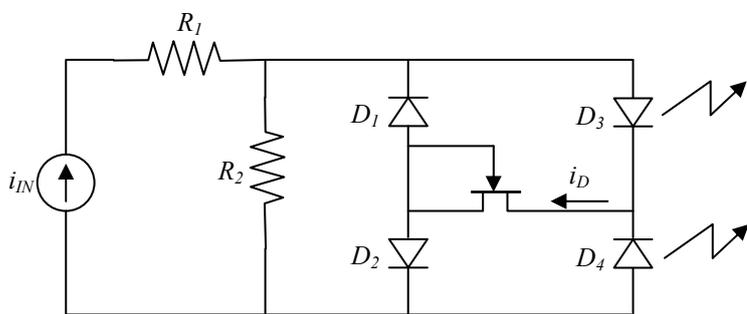


Figura 1.1

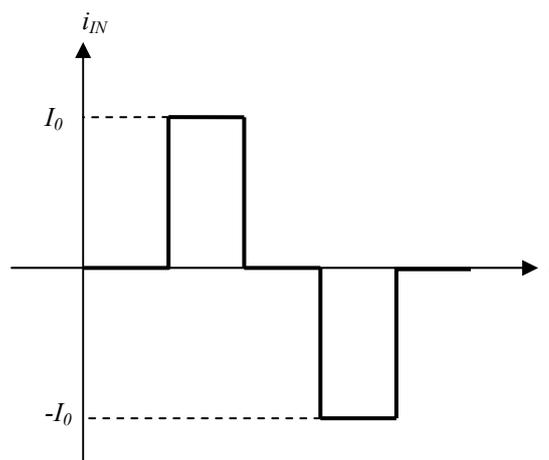


Figura 1.2

**SOLUCIÓN EJERCICIO 1**

a) Para  $i_{IN} = 0$ , no hay corriente en ningún elemento del circuito.  
 Para  $i_{IN} = I_0$ , los diodos  $D_3$  y  $D_2$  están en ON y los diodos  $D_1$  y  $D_4$  están en OFF, ya que la corriente no puede circular por ellos al encontrarse conectados en inversa. Por tanto el LED  $D_3$  se enciende con el impulso positivo de  $i_{IN}$ .  
 Para  $i_{IN} = -I_0$ , los diodos  $D_4$  y  $D_1$  están en ON y los diodos  $D_2$  y  $D_3$  están en OFF, ya que la corriente no puede circular por ellos al encontrarse conectados en inversa. Por tanto el LED  $D_4$  se enciende con el impulso negativo de  $i_{IN}$ .

b) Como  $v_{GS} = 0$ ,  $i_D = \kappa (V_{GS} - V_T)^2 = \kappa V_T^2 = 10 \text{ mA}$ .  
 Para  $i_{IN} = I_0$ ,  $i_{D3} = i_{D2} = i_D = 10 \text{ mA}$ .  
 Para  $i_{IN} = -I_0$ ,  $i_{D4} = i_{D1} = i_D = 10 \text{ mA}$ .

c) Para que el circuito funcione correctamente, el J-FET debe estar en saturación. Para ello se debe cumplir que:  
 $V_{GS} \geq V_T$ , que se cumple siempre, ya que es un J-FET con  $V_{GS} = 0$ , y  
 $V_{DS} \geq V_{DS,sat} = V_{GS} - V_T = 4\text{V}$

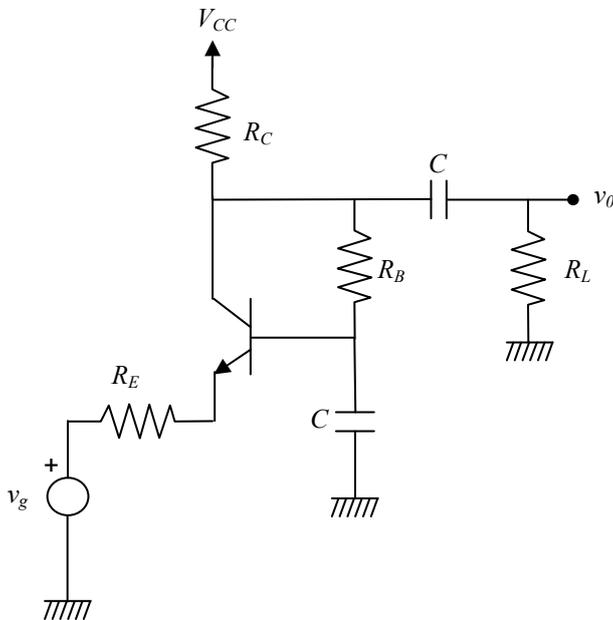
Para valores de  $i_{IN}$  positivos, con los diodos  $D_3$  y  $D_2$  en ON, se deberá cumplir:  $V_{R2} = (I_0 - i_D) \cdot R_2 = 2 V_\gamma + V_{DS} \geq 2 V_\gamma + 4$ ; de donde se obtiene  $I_0 \geq 64 \text{ mA}$ .

Para valores de  $i_{IN}$  negativos, con los diodos  $D_1$  y  $D_4$  en ON se obtiene que:  $V_{R2} = -(I_0 + i_D) \cdot R_2 = 2 V_\gamma + V_{DS} \geq 2 V_\gamma + 4$ ; de donde se obtiene  $-I_0 \geq 64 \text{ mA}$ , por tanto  $I_0 \leq -64 \text{ mA}$

Por tanto, el valor mínimo de  $I_0$  necesario para que el circuito funcione con el J-FET en saturación es  $64 \text{ mA}$ .

**Ejercicio 2.** El circuito de la figura 2.1 representa un amplificador en base común. Se le pide calcular:

- a) El punto de trabajo del transistor ( $I_C$ ,  $I_B$ ,  $V_{BE}$  y  $V_{CE}$ ). **(0,8 p)**
- b) Los parámetros del circuito equivalente en pequeña señal del transistor y dibujar el circuito equivalente en pequeña señal. **(0,7 p)**
- c) La ganancia de tensión,  $A_V=v_o/v_g$ . **(1 p)**



DATOS

$V_{CC} = 5 \text{ V}$ ;  
 $R_C = 2 \text{ k}\Omega$ ;  $R_E = 100 \Omega$ ;  
 $R_B = 50 \text{ k}\Omega$ ;  $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ ;  
 $V_t = 25 \text{ mV}$ ;  $C \rightarrow \infty$

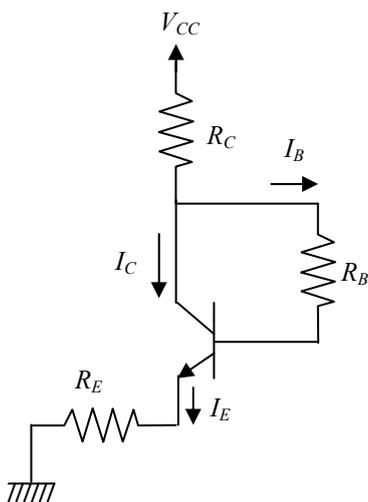
BJT:

$\beta = 100$ ;  $V_{\gamma E} = 0,7 \text{ V}$ ;  
 $V_{CE,sat} = 0,2 \text{ V}$ ;  $V_A \rightarrow \infty$

Figura 2.1

SOLUCIÓN EJERCICIO 2

- a) En continua el circuito a analizar es el siguiente:



Suponemos que el transistor está en activa, por tanto  $V_{BE}=0,7\text{V}$

$$V_{CC} = R_C (I_C + I_B) + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$$

Sabiendo que:  $I_C = \beta I_B$ ;  $I_E = I_C + I_B$

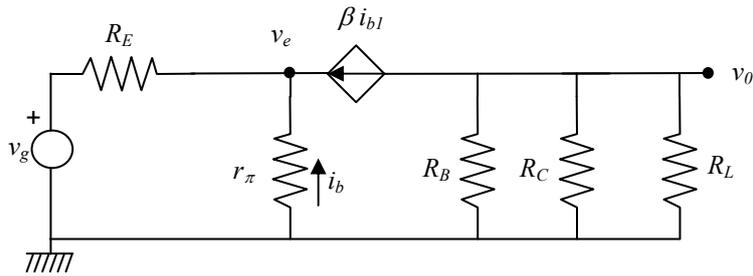
Se obtiene:  $I_B = 0,165 \cdot 10^{-4} \text{ A} \geq 0$ ;

Por tanto:  $I_C = \beta I_B = 1,65 \text{ mA}$

$$V_{CE} = (V_{CC} - (\beta + 1) I_B R_C) - R_E (\beta + 1) I_B = 1,535 \text{ V} \geq V_{CE,sat}$$

- b) El circuito equivalente en pequeña señal es:

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	



Donde  $r_\pi = V_T / I_B = 1,51 \text{ k}\Omega$

c) Analizando el circuito anterior por nudos se obtienen las siguientes ecuaciones :

$$v_0(1/R_B + 1/R_C + 1/R_L) = -\beta i_b = \beta v_e / r_\pi$$

$$v_e(1/R_E + 1/r_\pi) - v_g/R_E = \beta i_b = -\beta v_e / r_\pi$$

De donde se despeja :

$$\frac{v_0}{v_g} = \frac{\beta}{r_\pi R_E \left( \frac{1}{R_E} + \frac{1+\beta}{r_\pi} \right) \left( \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_L} \right)} = 5,7$$

**Ejercicio 3.** La figura 3.1 representa un par de transistores acoplados en continua que se utiliza en el circuito de la figura 3.2. Los transistores trabajan en activa. Se pide:

- Calcular el valor de  $\beta$  del transistor equivalente al par de la figura 3.1. ¿El transistor equivalente se comporta como npn o pnp? ¿Qué condiciones deben cumplirse para que el par funcione correctamente (con los 2 transistores en activa)? (1 p)
- Calcular la expresión de la resistencia de entrada y de la ganancia en corriente en pequeña señal del circuito de la figura 3.2 en función de los parámetros de los transistores en pequeña señal ( $\beta_1, \beta_2, r_{\pi 1}$  y  $r_{\pi 2}$ ) y de los componentes del circuito. (1,5 p)

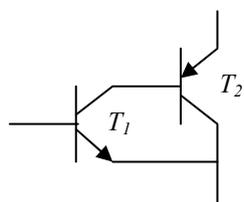


Figura 3.1

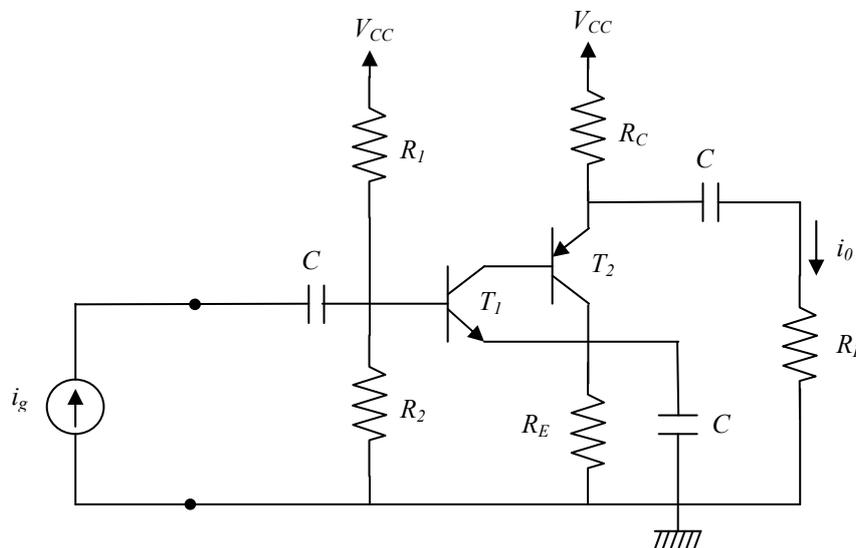


Figura 3.2

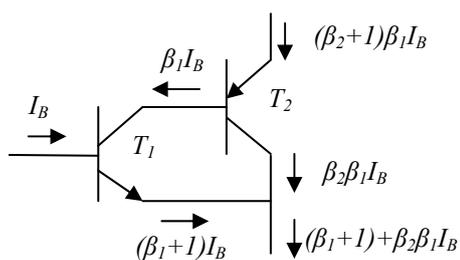
DATOS:  $C \rightarrow \infty$

Para  $T_1$ :  $V_{\gamma E1} = 0,7V$ ;  $V_{CE1,sat} = 0,2V$ ;  $\beta_1 = 200$ ;  $r_{\pi 1}$ ;  $V_{A1} \rightarrow \infty$

Para  $T_2$ :  $V_{\gamma E2} = 0,7V$ ;  $V_{EC2,sat} = 0,2V$ ;  $\beta_2 = 100$ ;  $r_{\pi 2}$ ;  $V_{A2} \rightarrow \infty$

SOLUCIÓN EJERCICIO 3

a) Analizando el circuito se obtiene:



Por tanto el transistor equivalente se comporta como un npn, en el que:

$$I_C = (\beta_2 + 1) \beta_1 I_B \approx \beta_2 \beta_1 I_B$$

Por tanto el transistor equivalente tendrá una  $\beta = \beta_2 \beta_1 = 2 \cdot 10^4$

Para que ninguno de los transistores se salga de activa debe ocurrir que:

$$I_{B1} \geq 0; I_{B2} \geq 0 \text{ y } I_B \geq 0$$

Además:  $V_{CE1} \geq V_{CE1sat}$

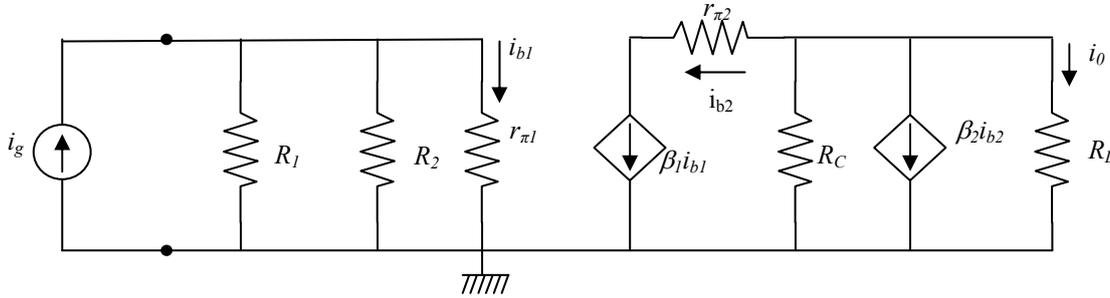
$$V_{EC2} = V_{CE1} + V_{EB2} \geq V_{EC2sat}$$

$$V_{CEeq} = V_{EC2} = V_{CE1} + V_{EB2} \geq V_{CE1sat} + V_{\gamma E1} = 0,9V.$$

T1 entraría antes en saturación, luego se debe cumplir  $V_{CE1} \geq V_{CE1sat}$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

b) El circuito equivalente en pequeña señal es:



Analizando este circuito se obtiene:

$$R_{eml} = R_1 // R_2 // r_{\pi 1}$$

$$A_i = \frac{i_l}{i_g} = \frac{-\beta_1 \beta_2 R_C (R_1 // R_2)}{(R_C + R_L)((R_1 // R_2) + r_{\pi 1})}$$

**Ejercicio 4.** El circuito de la figura 4.1 está formado por un generador de corriente, un transistor npn y un condensador. El generador de entrada suministra una señal como la mostrada en la figura 4.2.

- a) Para  $t < 0$ , diga el estado en el que se encuentra el transistor. Calcule el valor de la tensión en el condensador,  $v_{C1}(t)$ . **(0,5p)**  
 b) Para  $t \rightarrow \infty$ , diga el estado en el que se encuentra el transistor y calcule el valor de la tensión en el condensador,  $v_{C1}(t)$ . **(0,5p)**  
 c) Calcule la tensión y la corriente en el condensador para  $t > 0$ ,  $v_{C1}(t)$  e  $i_{C1}(t)$  y la corriente de colector del transistor,  $i_C(t)$  para  $t > 0$ . Represente gráficamente estas tres variables. **(1,5p)**

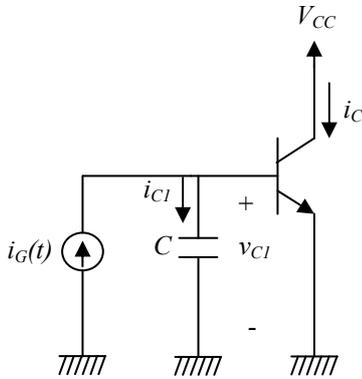


Figura 4.1

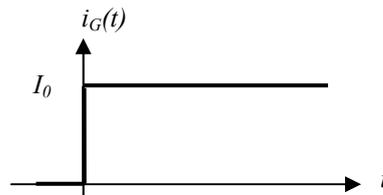


Figura 4.2

DATOS:

$$V_{CC} = 5V; C_1 = 10pF; I_0 = 10 \mu A$$

TRANSISTOR BIPOLAR:

$$V_{\gamma E} = 0,7V; V_{CE,sat} = 0,2V; \beta = 100$$

Considere despreciables los efectos capacitivos del transistor

SOLUCIÓN EJERCICIO 4

a) Para  $t < 0$ ,  $i_G(t) = 0A$ . No hay corriente en el condensador ni en la base de transistor. El transistor está en corte. La tensión en el condensador es 0:  $v_{C1}(t) = 0$ , para  $t < 0$ .

b) Para  $t \rightarrow \infty$ ,  $i_G(t) = 10 \mu A$ . El condensador se comporta como un abierto, por tanto  $i_B(t) = i_G(t) = 10 \mu A$ .

El transistor está en activa, ya que  $i_B > 0$  y  $v_{CE}(t) = V_{CC} - 0 = 5V \geq V_{CEsat}$

Por tanto  $i_C = \beta i_B = 1 \text{ mA}$  y  $v_{C1} = v_{BE} = V_{\gamma E} = 0,7V$

c) En  $t = 0^+$  el condensador mantiene su tensión:  $v_{C1}(t=0^+) = v_{C1}(t=0^-) = 0V$ .

El transistor está en corte, ya que  $v_{BE}(t=0^+) = v_{C1}(t=0^+) = 0$ . La corriente del generador  $i_G$  atraviesa el condensador y se cumple:

$$i_{C1}(t) = C_1 \cdot dv_{C1}(t)/dt = I_0$$

por tanto,  $v_{C1}(t) = I_0 \cdot t / C_1 + v_{C1}(t=0^+) = I_0 \cdot t / C_1$

Esta situación se mantendrá hasta que  $v_{C1}(t) = V_{\gamma E} = 0,7V$ ; es decir, hasta  $t_1 = V_{\gamma E} \cdot C_1 / I_0 = 0,7 \mu s$ .

A partir del momento en que  $v_{C1}(t) = V_{\gamma E} = 0,7V$ , la tensión del condensador permanece constante a ese valor (alcanza su valor final) y su corriente  $i_{C1}(t) = C_1 \cdot dv_{C1}(t)/dt = 0$ .

El transistor empieza a conducir en activa, ya que  $i_B = i_G > 0$  y  $v_{CE}(t) = V_{CC} - 0 = 5V \geq V_{CEsat}$ . Por tanto  $i_C(t) = \beta i_B = 1 \text{ mA}$  para  $t \geq 0,7 \mu s$ .

$$v_{C1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t \leq 0 \\ I_0 \cdot t / C_1 & \text{para } 0 < t \leq 0,7 \mu s \\ V_{\gamma E} & \text{para } t \geq 0,7 \mu s \end{cases}$$

$$i_{C1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t \leq 0 \\ I_0 & \text{para } 0 < t \leq 0,7 \mu s \\ 0 & \text{para } t > 0,7 \mu s \end{cases}$$

$$i_C(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0,7 \mu s \\ \beta I_0 & \text{para } t \geq 0,7 \mu s \end{cases}$$

<b>APELLIDOS</b>			
<b>NOMBRE</b>		<b>N° DNI</b>	

