

FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA

Examen 1ª Convocatoria. Primer Parcial (2014-2015)

Apellidos, Nombre:

Compañía:

Sección AGM:

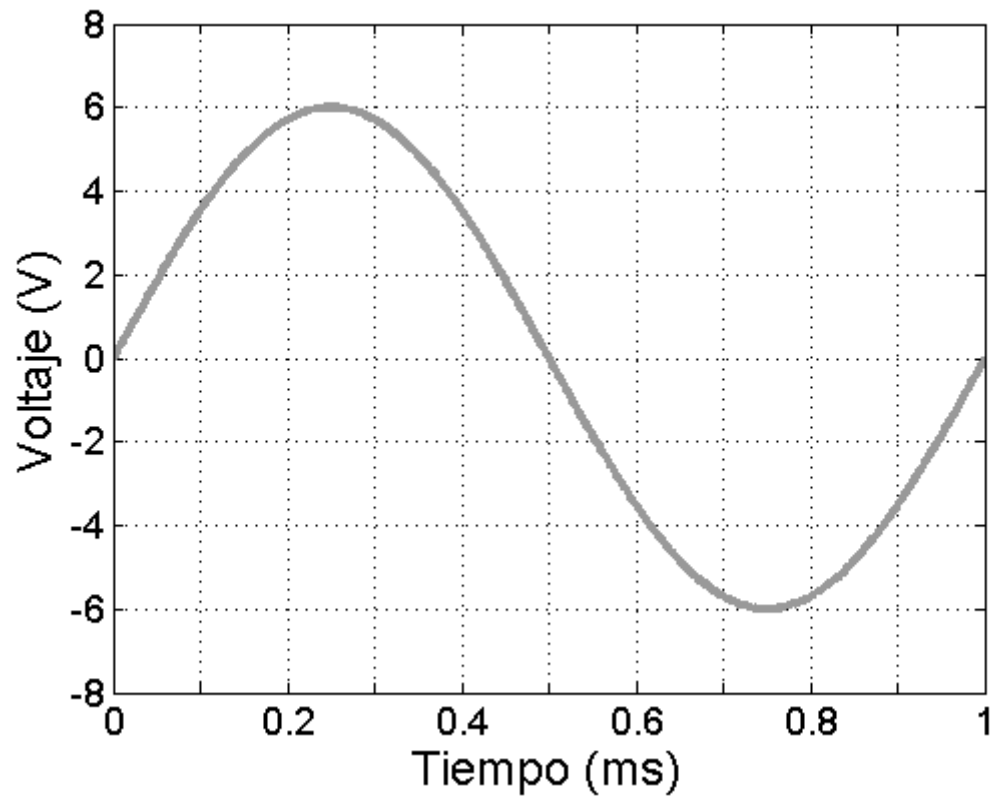
Grupo CUD:

Fecha: 28/01/2015

- Rellene sus datos personales
- Esta hoja será grapada a los folios con las soluciones
- Comience cada ejercicio en folio nuevo
- Compruebe que tiene todas las cuestiones y ejercicios resueltos
- El examen deberá ser escrito a bolígrafo
- No usar bolígrafo rojo ni Tipp-Ex
- Se puede utilizar calculadora pero debe ser NO programable

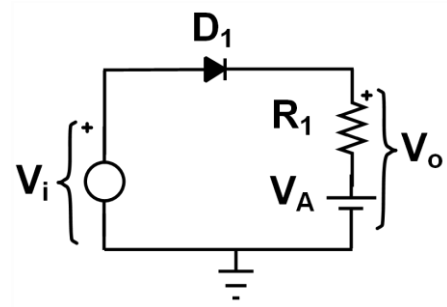
Ejercicio 1	Ejercicio 2	Ejercicio 3
/ 2	/ 3	/ 3
Cuestión 1	NOTA FINAL	
/ 2		

Figura 2 para el ejercicio 1



EJERCICIO 1 (2 puntos)

- a) Dado el circuito de la figura ($V_A = 1V$ y $R_1 = 1\text{ k}\Omega$), calcule el valor del voltaje V_0 para una V_i que varía entre $(-\infty, \infty)$.
- b) Dibuje la señal V_{01} (en la figura 2) para la señal de entrada V_{i1} representada en gris en la figura 2 (adjunta en otra hoja).
- c) Dada la señal de entrada V_{i2} (gris) y la señal de salida V_{02} (negro) de la figura 3. Dibuje el esquema del circuito que proporciona esa señal de salida (V_{02}) para la señal de entrada (V_{i2}) dada.



Suponga que la tensión en directa de **todos** los diodos es $V_\gamma = 0.7V$ y se dispone únicamente de diodos zener con tensión de ruptura $|V_z| = 2.5V$.

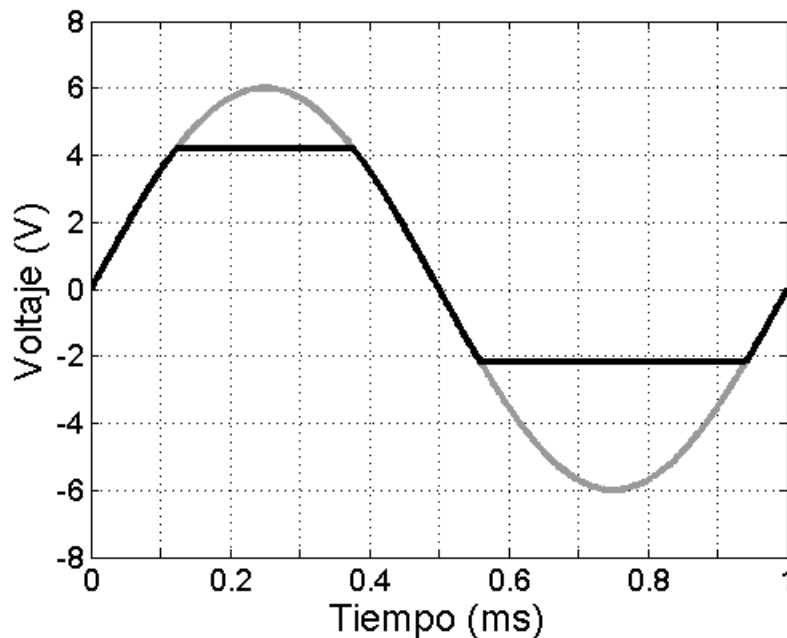


Figura 3. Señal de entrada (gris) y señal de salida (negro)

CUESTIÓN 1 (2 puntos)

Describa el modelo de bandas. Mencione y justifique los tres tipos de materiales que existen en función de su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Defina el concepto de hueco en un material semiconductor. Mencione los elementos químicos más usuales en la electrónica actual para generar un semiconductor tipo P. Justifique su respuesta.

Calcule la concentración de huecos y el nivel de Fermi en un material semiconductor basado en Germanio a temperatura ambiente ($T = 300K$):

- Intrínseco
- Con una concentración homogénea de impurezas donadoras ($N_D = 10^{15}\text{ cm}^{-3}$)
- Con una concentración homogénea de impurezas donadoras ($N_D = 10^{15}\text{ cm}^{-3}$) y aceptadoras ($N_A = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$)

Datos:

$$N_C = 1.02 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}, N_V = 5.64 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}, E_g = 0.67\text{ eV}$$

$$\mu_n = 3900\text{ cm}^2/(\text{Vs}), \mu_p = 1820\text{ cm}^2/(\text{Vs}), q = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{ C}, k = 86.2 \cdot 10^{-6}\text{ eV/K}$$

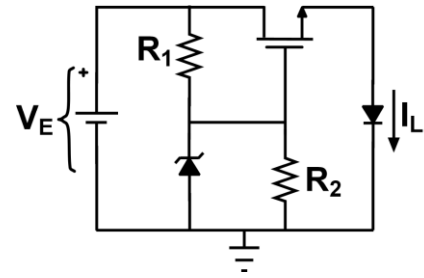
EJERCICIO 2 (3 puntos)

Sea el siguiente circuito basado en un transistor NMOS, un diodo LED y un diodo Zener.

V_E fuente de tensión continua, $R_1 = 200 \Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$
 NMOS: $K = 20 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $W/L = 120$, $V_T = 1\text{V}$

Calcule:

- La corriente a través del diodo LED I_L para un voltaje $V_E = 9 \text{ V}$. **(1 punto)**
- La tensión V_E para la cual circula a través del LED la corriente óptima de funcionamiento. **(0.5 puntos)**
- La tensión V_E mínima para que el diodo LED esté encendido. **(0.75 puntos)**
- La tensión V_E máxima teniendo en cuenta las limitaciones de los diodos. **(0.75 puntos)**



LED:

Tensión en directa $V_Y = 2.5 \text{ V}$

Intensidad máxima 100 mA

Intensidad óptima de funcionamiento 25 mA

Zener:

Tensión en directa $V_Y = 0.8 \text{ V}$

Tensión de ruptura $|V_Z| = 12 \text{ V}$

Potencia máxima 600 mW

Intensidad máxima en directa 100 mA

EJERCICIO 3 (3 puntos)

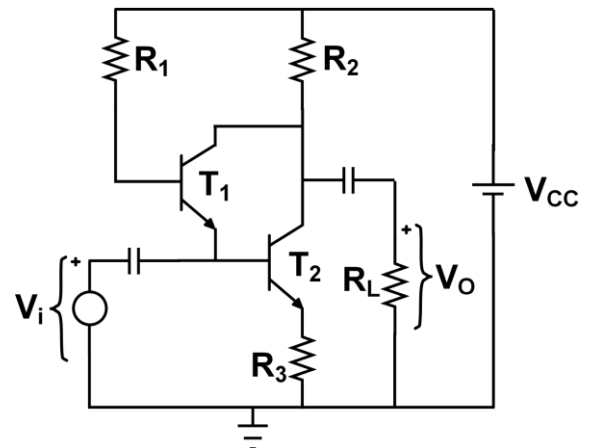
Sea el siguiente circuito basado en dos transistores NPN:

$V_{CC} = 15 \text{ V}$, V_i fuente de tensión alterna

$R_1 = 2 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 600 \Omega$, $R_3 = 200 \Omega$, $R_L = 1.6 \text{ k}\Omega$

NPN: $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ si la unión BE está en directa, $\beta = 50$

- Determine la región de operación de los transistores teniendo en cuenta los resultados del punto de operación que se recogen en la tabla. Compruebe que todos los datos de la tabla son coherentes con la región para justificar su respuesta. **(0.5 puntos)**



T ₁ :	T ₂ :
$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$	$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$
$V_{CE} = 3.07 \text{ V}$	$V_{CE} = 3.77 \text{ V}$
$I_B = 5.4 \mu\text{A}$	$I_B = 275 \mu\text{A}$
$I_C = 270 \mu\text{A}$	$I_C = 13.76 \text{ mA}$

- Represente el modelo de pequeña señal del circuito. **(0.25 puntos)**
- Calcule: **(1.5 puntos)**
 - La ganancia en tensión V_O/V_i
 - La resistencia de entrada
 - La resistencia de salida

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad V_T = 25.8 \text{ mV}$$

Determine si la etapa es amplificadora o atenuadora e inversora o no inversora.

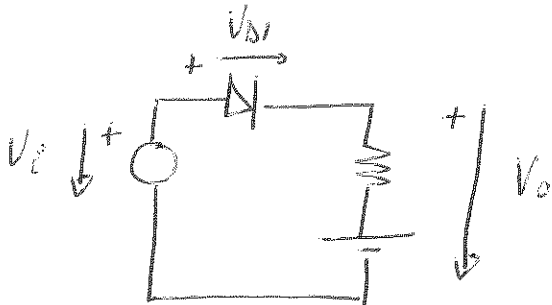
- Calcular la resistencia R_2 máxima para poder aplicar el modelo de pequeña señal. **(0.75 puntos)**

Ejercicio 1

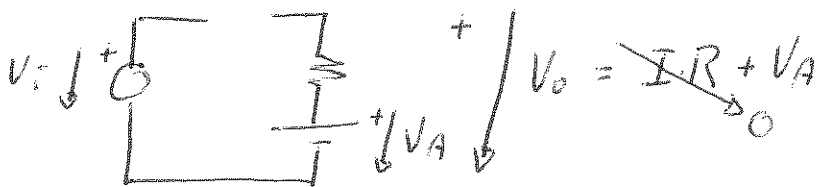
a) Límite de conducción del D_1

$$V_i = V_{D_1} + V_o \Rightarrow V_{D_1} = V_i - V_o$$

$$\left. \begin{array}{l} V_i - V_o < V_{\gamma} \Rightarrow D_1 \text{ off} \\ V_i - V_o \geq V_{\gamma} \Rightarrow D_1 \text{ on} \end{array} \right\}$$



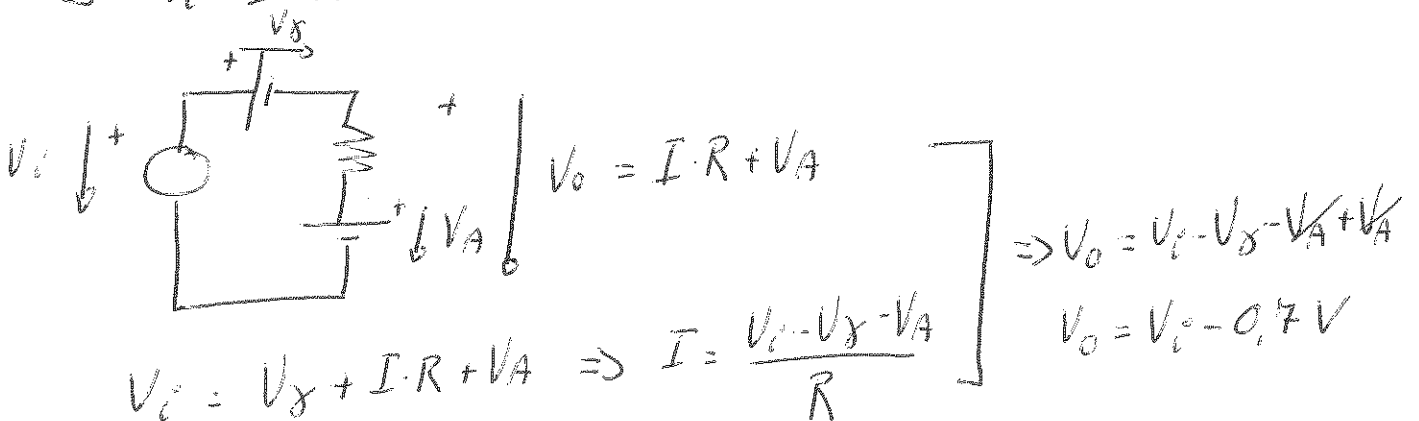
Suponemos D_1 off



Comprobamos: Si D_1 off \Rightarrow

$$\begin{aligned} V_i - V_o &< V_{\gamma} \\ V_i - V_A &< V_{\gamma} \\ V_i &< V_{\gamma} + V_A = 1.7V \end{aligned}$$

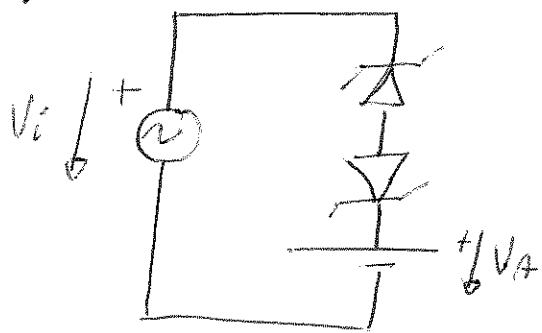
Si $V_i \geq 1.7V \Rightarrow D_1$ on



$$V_i = V_{\gamma} + I \cdot R + V_A \Rightarrow I = \frac{V_i - V_{\gamma} - V_A}{R}$$

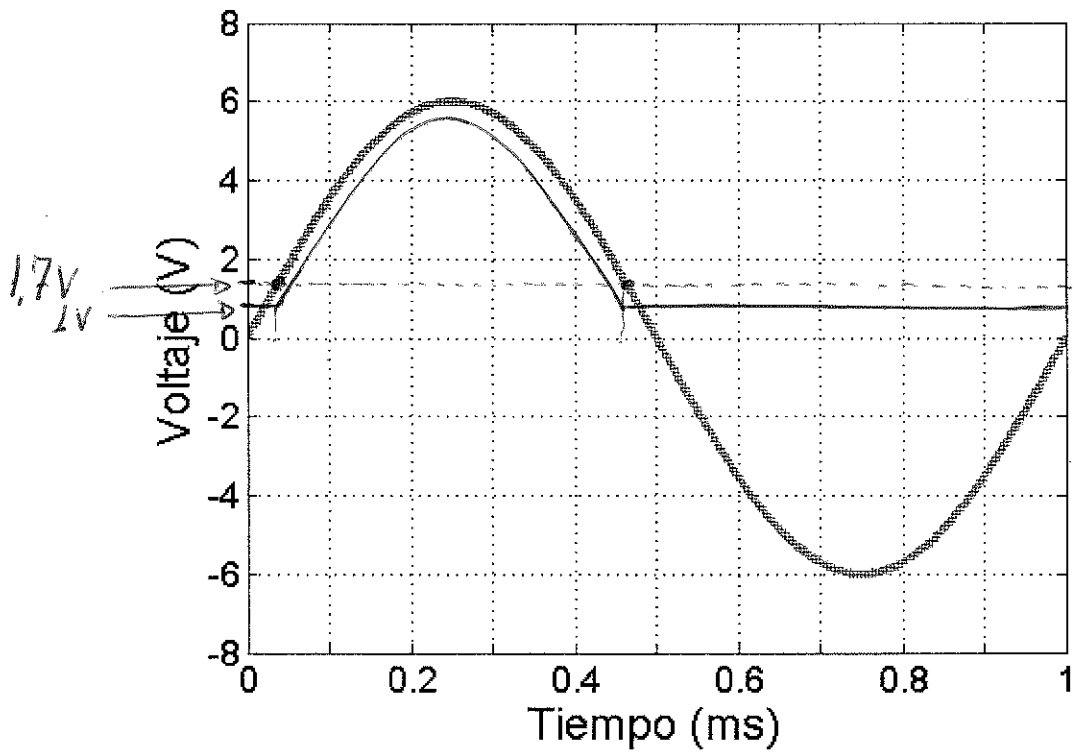
$$\begin{aligned} \Rightarrow V_o &= V_i - V_{\gamma} - \cancel{V_A} + V_A \\ V_o &= V_i - 0.7V \end{aligned}$$

c)



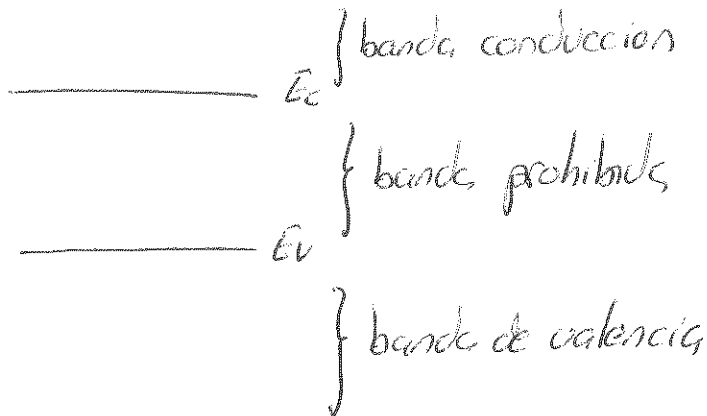
$$V_o = \begin{cases} 4,2V & V_i \geq 4,2V \\ V_i & -2,2 < V_i < 4,2V \\ -2,2 & V_i \leq -2,2V \end{cases}$$

Figura 2 para el ejercicio 1



Cuestión 1

Modelo de bandas:



En la banda de conducción están los electrones libres, los electrones de la banda de valencia son electrones ligados. En la banda de valencia, los huecos son los que contribuyen a la corriente.

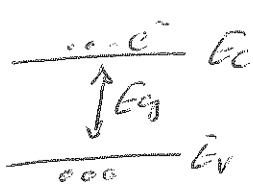
En la banda prohibida, no hay ni electrones ni huecos, a no ser que se cree un defecto permitido mediante dopado.

A la corriente sólo contribuyen los e^- de la banda de conducción y los huecos en la de valencia.

AISLANTE \Rightarrow E_g es muy grande con lo que no hay electrones en la banda de conducción, ni huecos en la de valencia. No hay portadores \Rightarrow No hay corriente.

Al ser E_g grande necesitaríamos un aporte de energía demasiado alto para liberar un e^- de la banda de valencia.

SEMICONDUCTOR



Tiene e^- en la banda de conducción y huecos en la de valencia \Rightarrow Puede haber corriente.

METAL

Están unidas la banda de conducción y de valencia \Rightarrow Hay movilidad de portadores \Rightarrow Puede haber corriente.

Un hueco es la presencia de un átomo en la red del semiconductor con 7 electrones en su capa de valencia. Este átomo tiende a captar un electrón. Ese electrón lo puede captar rompiendo un enlace covalente de un átomo vecino. Con esto se mueve un electrón ligado de un átomo a otro.

Un hueco que se mueve en la banda de valencia equivale a un electrón de esta capa que se mueve en dirección contraria.

Un semiconductor tipo P suele estar constituido por Si o Ge y por Boro.

$$a) p_0 = n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} = 1,8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$E_i = \frac{E_g}{2} = 0,335 \text{ eV}$$

$$b) N_D \gg n_i \Rightarrow n_0 \approx N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 3,24 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

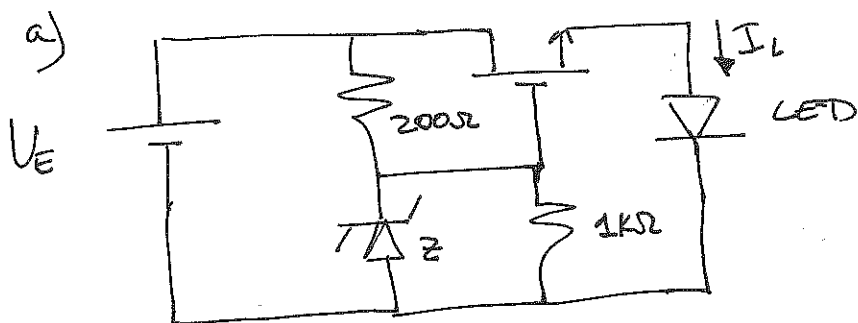
$$E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,103 \text{ eV}$$

$$c) N_A - N_D = 9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \gg n_i$$

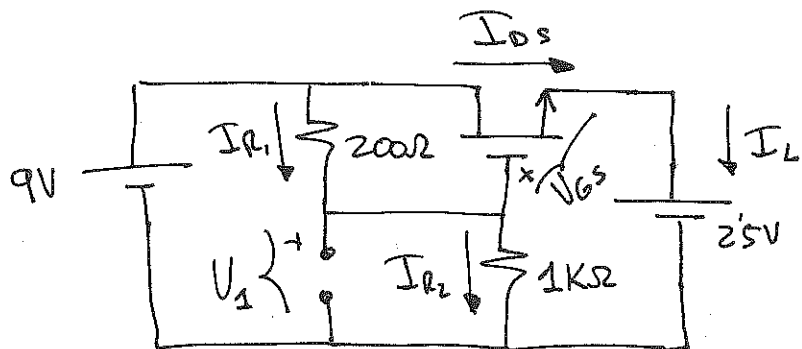
$$p_0 \approx 9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{p_0}{n_i} = 0,16 \text{ eV}$$

Ejercicio 2



Para $V_E = 9V$ } LED ON
 Supongo } ZENER OFF
 MOS SATURACION



$$I_{R1} = I_{R2} \Rightarrow I_{R1} = \frac{9V}{1200\Omega} = 7.5mA$$

$$\Rightarrow V_1 = 7.5mA \cdot 1k\Omega = 7.5V$$

$$V_1 < V_2 = 12V$$

$$V_1 > -V_Z = -0.8V$$

OK ZENER OFF

$$V_1 = V_{GS} + 2.5V \rightarrow V_{GS} = 5V \rightarrow I_{DS} = \frac{K}{2} \frac{\omega}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = 19.2mA$$

$$\Rightarrow I_L = I_{DS} = 19.2mA > 0 \text{ OK LED ON}$$

$$V_{DS} = I_{R1} \cdot 200\Omega + V_{GS} > V_{GS} - V_T$$

OK MOS SATURACION.
 (La 1ª condición siempre se cumple)

b) MISMO SUPUESTO

$$I_L = 25mA > 0 \text{ (LED ON)} \rightarrow I_{DS} = I_L \rightarrow V_{GS} = 5.56V > V_T \text{ OK MOS SAT.}$$

$$V_1 = V_{GS} + 2.5V = 8.06V$$

$< V_2$ OK ZENER OFF
 $> -V_Z$

$$\Rightarrow V_E = \frac{1200}{1000} \cdot V_1 = 9.68V$$

c) MISMO SUPUESTO CON $I_L = 0$, CONDICIÓN LÍMITE PARA EL DIODO EN DIRECTA, LUEGO EL LED ENCENDIDO

$$I_{DS} = I_L = 0 \rightarrow V_{GS} = V_T = 1V \rightarrow V_1 = V_{GS} + 2.5V = 3.5V$$

COND. LÍMITE ENTRE SAT. Y CORTE

$< V_2$
 $> -V_Z$
 OK ZENER OFF

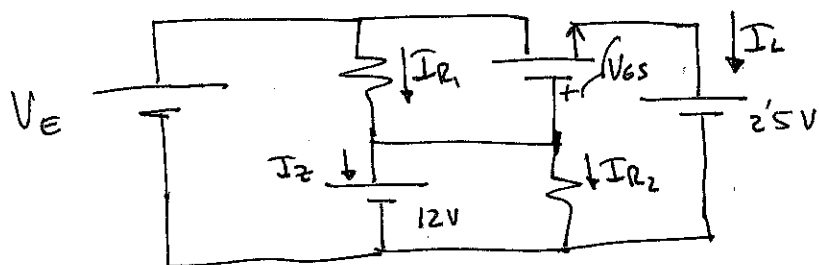
$$\Rightarrow V_E = 1.2 V_1 = 4.2V$$

d) bajo el mismo supuesto:

$$I_{L \text{ MAX}} = 100 \text{ mA} \rightarrow I_{DS} = 100 \text{ mA} \rightarrow V_{GS} = 10'13 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_A = V_{GS} + 2'5 = 12'63 \begin{cases} > V_Z \rightarrow \text{Luego el Zener en ruptura} \\ > -V_X \end{cases}$$

Supongo $\begin{cases} \text{ZENER EN RUPTURA} \\ \text{LED ON} \\ \text{MOS SATURACION} \end{cases}$



$$V_{GS} = 12 - 2'5 = 9'5 \text{ V} > V_T \quad \text{OK MOS SAT.}$$

$$\Rightarrow I_{DS} = I_L = 86'7 \text{ mA} \begin{cases} > 0 \\ < 100 \text{ mA} \end{cases}$$

OK LED ON
 $I_L < I_{L \text{ MAX}}$

$$I_{R2} = \frac{12 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 12 \text{ mA}$$

$$I_{R1} = I_Z + I_{R2}$$

$$I_{Z \text{ MAX}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{V_Z} = \frac{600 \text{ mW}}{12 \text{ V}} = 50 \text{ mA} \Rightarrow I_{R1 \text{ MAX}} = 62 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_{E, \text{ MAX}} = I_{R1 \text{ MAX}} \cdot 200 \Omega + V_Z = 24'4 \text{ V}$$

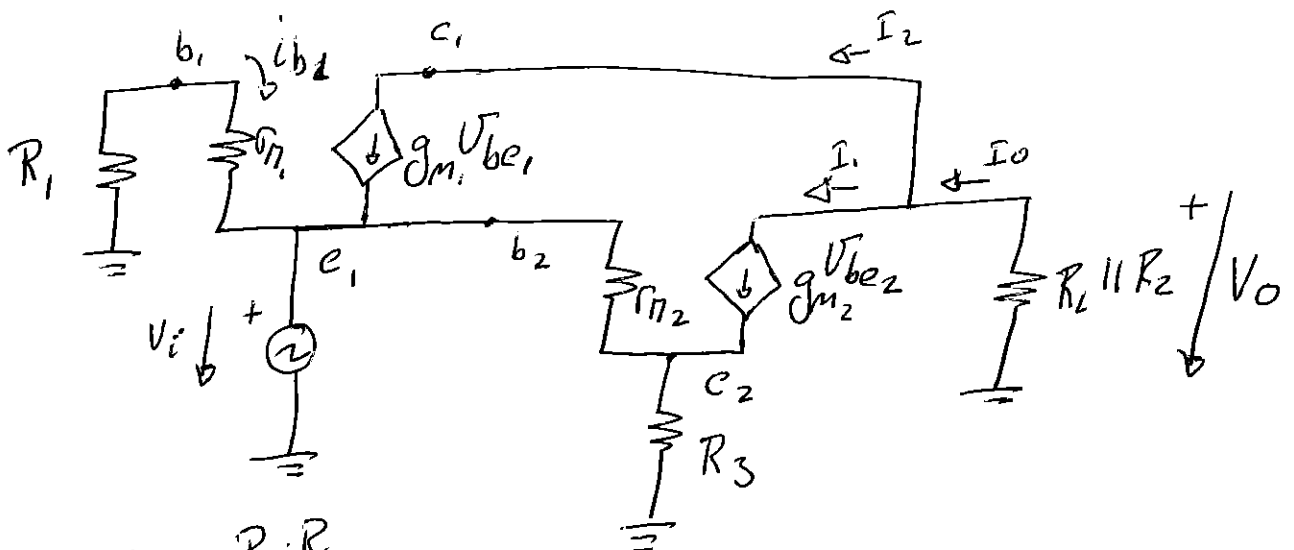
Ejercicio 3

a) Los dos transistores están en activo, ya que:

$$V_{CE1} = 3,07V > 0,2V \quad I_{C1} = \beta I_{B1} = 50 \cdot 5,4 \mu A = 270 \mu A$$

$$V_{CE2} = 3,77V > 0,2V \quad I_{C2} = \beta I_{B2} = 50 \cdot 275 \mu A = 13,76 mA$$

b)



$$R_L \parallel R_2 = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L} = 0,436 k\Omega$$

$$r_{\pi 1} = \frac{\beta}{g_{m1}} = \frac{50}{10,46} = 4,8 k\Omega \quad r_{\pi 2} = 94,2$$

$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T} = 10,46 \frac{mA}{V} \quad g_{m2} = 533,3 \frac{mA}{V}$$

$$V_o = -I_o (R_L \parallel R_2)$$

$$I_o = I_1 + I_2$$

$$I_1 = g_{m2} V_{be2} = \beta i_{b2} = \frac{\beta V_i}{r_{\pi 2} + (1+\beta)R_3}$$

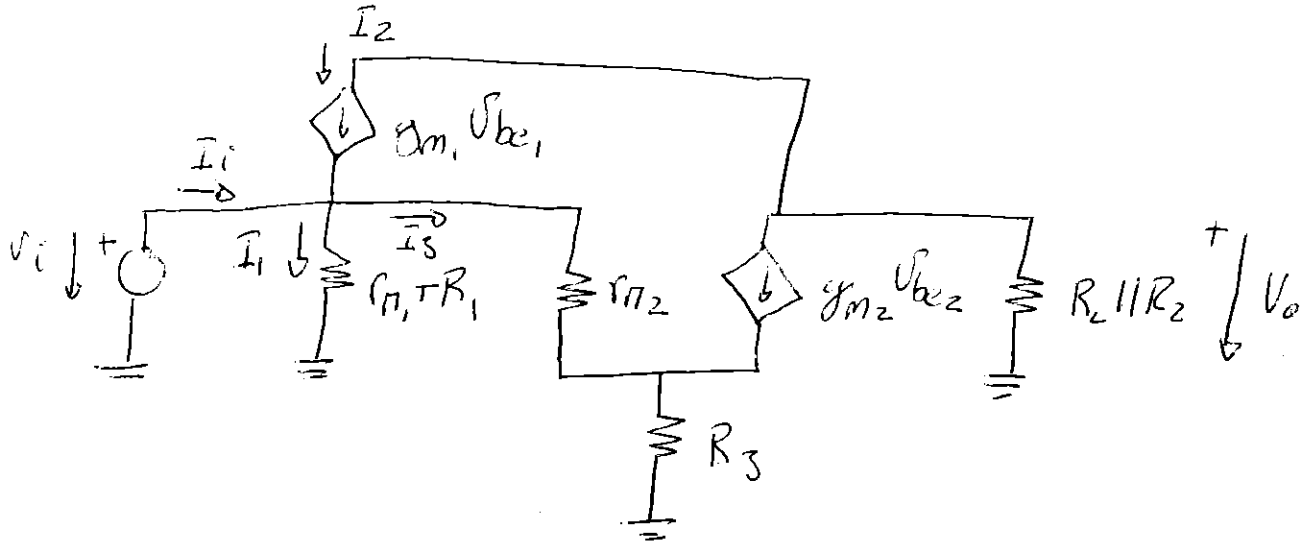
$$V_i = i_{b2} (r_{\pi 2} + (1+\beta)R_3) \Rightarrow i_{b2} = \frac{V_i}{r_{\pi 2} + (1+\beta)R_3}$$

$$I_2 = \beta i_{b1} \quad \left. \begin{array}{l} V_i = -i_{b1} (R_1 + r_{\pi 1}) \end{array} \right\} \Rightarrow I_2 = -\frac{\beta V_i}{R_1 + r_{\pi 1}}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \beta \cdot R_2 \parallel R_2 \left[\frac{1}{r_{\pi_2} + (1+\beta)R_3} - \frac{1}{R_1 + r_{\pi_1}} \right] = 2,11$$

Etapa amplificadora
no inversora

ii.



$$I_i = I_1 + I_3 - I_2$$

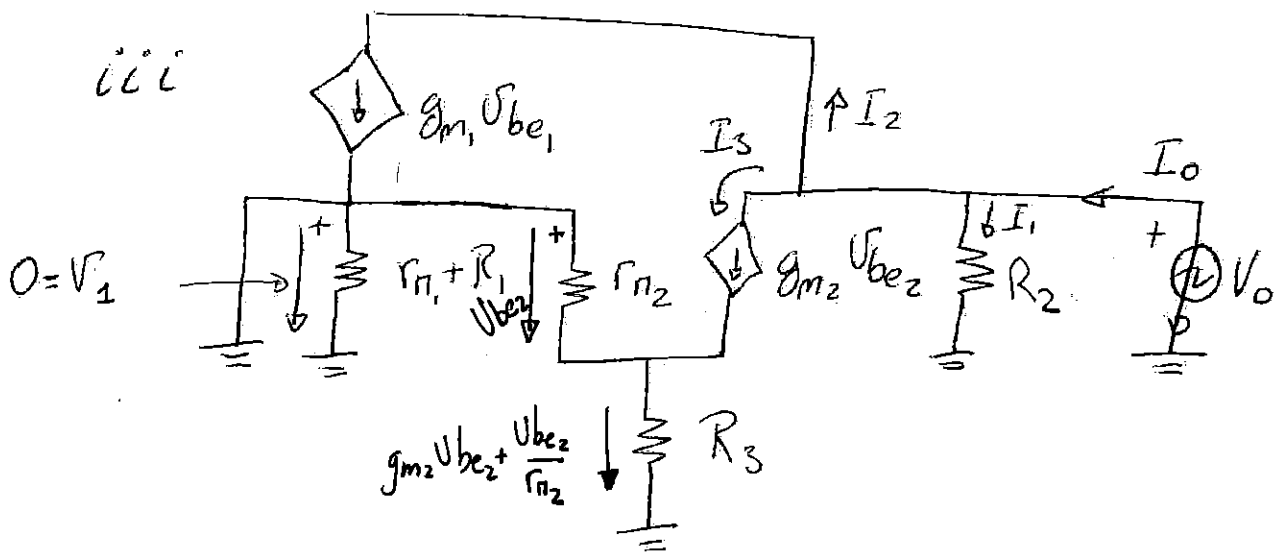
$$I_1 = \frac{V_i}{r_{\pi_1} + R_1} \quad I_3 = \frac{V_i}{r_{\pi_2} + (1+\beta)R_3}$$

$$I_2 = g_{m_1} V_{be_1} = -g_{m_1} I_1 r_{\pi_1} = -\frac{g_{m_1} r_{\pi_1}}{r_{\pi_1} + R_1} V_i$$

$$V_{be_1} = -I_1 r_{\pi_1}$$

$$I_i = V_i \left[\frac{1}{r_{\pi_1} + R_1} + \frac{1}{r_{\pi_2} + (1+\beta)R_3} + \frac{g_{m_1} r_{\pi_1}}{r_{\pi_1} + R_1} \right] = 0,122 V_i$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{0,122 V_i} = 8,16 \text{ k}\Omega$$



$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \quad I_o = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_1 = \frac{V_o}{R_2}$$

$$V_1 = 0 \rightarrow V_{be1} = 0$$

$$I_2 = g_{m1} V_{be1} = g_{m1} \cdot 0 = 0$$

$$V_{be2} + \left(g_{m2} V_{be2} + \frac{V_{be2}}{r_{\pi 2}} \right) R_3 = 0$$

$$I_3 = g_{m2} V_{be2} = 0$$

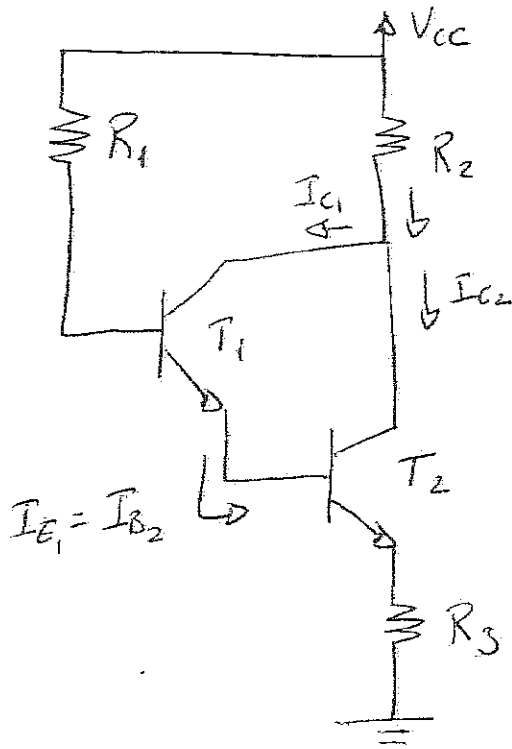
$$V_{be2} = 0$$

$$\Rightarrow R_o = \frac{V_o}{\frac{V_o}{R_2}} = R_2 = 600 \Omega$$

$$d) \quad \left. \begin{aligned} V_{CE_1} &= V_{CB_2} \\ V_{CE_2} &= V_{CE_1} + V_{BE_2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{CE_1} < V_{CE_2}$$



T1 entra primero en saturación



$$(1) \quad V_{CC} = (I_{C_1} + I_{C_2}) R_2 + V_{CE_1} + V_{BE_2} + I_{E_2} \cdot R_3$$

$$I_{C_2} = \beta I_{B_2} = \beta I_{E_1} = \beta (\beta + 1) I_{B_1}$$

$$I_{E_2} = (\beta + 1) I_{B_2} = (\beta + 1) I_{E_1} = (\beta + 1)^2 I_{B_1}$$

$$I_{C_1} = \beta I_{B_1}$$

$$(2) \quad V_{CC} = I_{B_1} R_1 + V_{BE_1} + V_{BE_2} + I_{E_2} \cdot R_3 = \\ = I_{B_1} [R_1 + (\beta + 1)^2 R_3] + V_{BE_1} + V_{BE_2}$$

$$(2) \Rightarrow I_{B_1} = \frac{V_{CC} - V_{BE_1} - V_{BE_2}}{R_1 + (\beta + 1)^2 R_3} = 5,4 \mu A$$

$$(1) \left. \right] \Rightarrow R_2 = \frac{V_{CC} - V_{BE_2} - V_{CE_1} - (\beta + 1)^2 I_{B_1} R_3}{(2\beta + \beta^2) I_{B_1}} = 804 \Omega$$