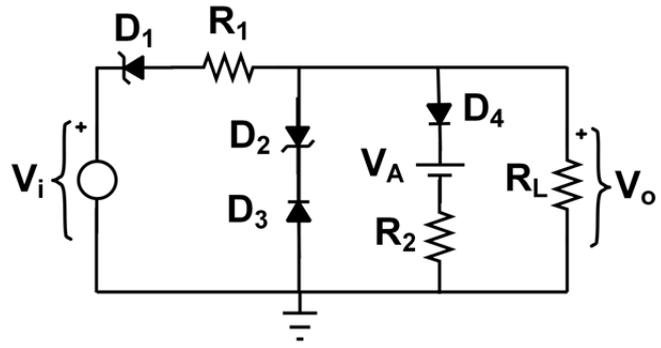


EJERCICIO 1

Dado el siguiente circuito en el que todas las resistencias tienen el mismo valor:

- a) Calcule el valor del voltaje V_0 cuando $V_A = 8.5V$ y $V_i \in (-\infty, 16]$. **(1 punto)**
- b) Describa los límites de funcionamiento de los diodos D_1, D_2, D_3 y D_4 , para cada una de sus regiones, en función de V_i . **(1 punto)**



Suponga el siguiente modelo lineal para los diodos:

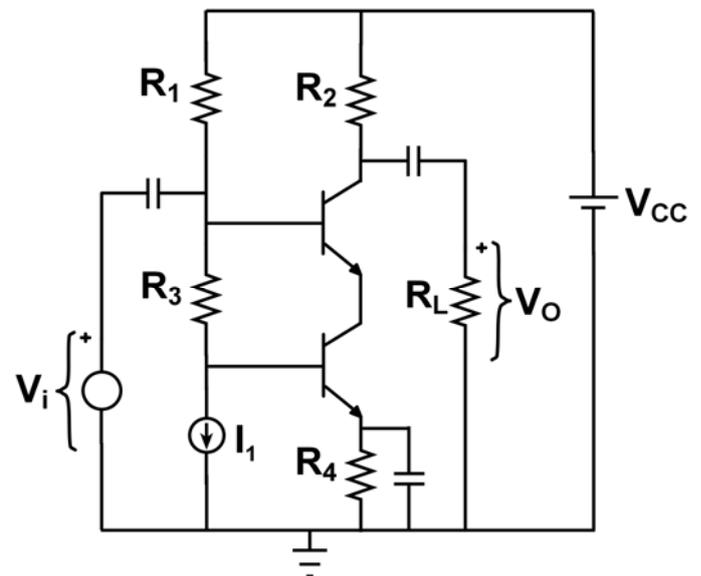
- La tensión en directa de **todos** los diodos es $V_\gamma = 0.7V$.
- Ambos diodos zener tienen una tensión de ruptura de $|V_z| = 3.2V$.

EJERCICIO 2

Sea el siguiente circuito basado en dos transistores bipolares NPN donde todos los condensadores son de desacoplo.

- $\beta_f = 200, V_{CC} = 24 V, I_1 = 6mA$
 $R_1 = 1.2 k\Omega, R_2 = 0.5 k\Omega, R_3 = 1.8 k\Omega$
 $R_4 = 0.5 k\Omega, R_L = 2 k\Omega,$
 V_i fuente de tensión alterna

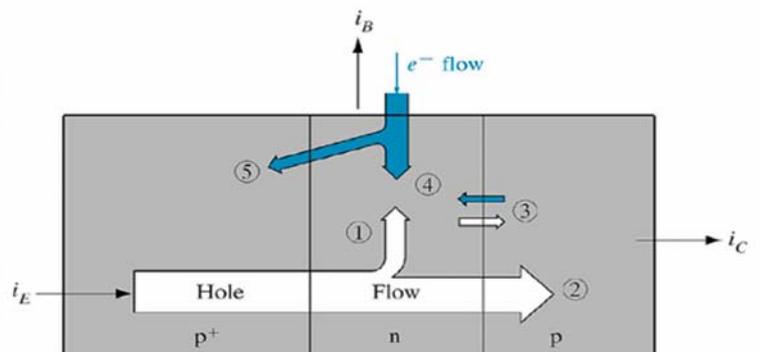
- a) Calcular el punto de polarización. Considere $V_{BE} = 0,7 V$ si la unión BE está en directa. Resolver sin despreciar la corriente de base. Recuerde que en la fuente de corriente continua I_1 cae una tensión V_1 diferente de 0 V. **(1 punto)**



- b) Representar el modelo de pequeña señal del circuito. **(0.5 puntos)**
- c) Obtener la ganancia ($A = V_0/V_i$) del circuito en pequeña señal. Suponga $V_T = 25,8 mV, g_m = I_{CQ} / V_T$ y $r_\pi = \beta/g_m$. **(0.75 puntos)**
 Dada la ganancia $A = V_0/V_i$, determinar las características de la etapa (inversora o no inversora, amplificadora o atenuadora) **(0.25 puntos)**
- d) Calcular la R_2 máxima para poder aplicar el modelo de pequeña señal. **(0.5 puntos)**

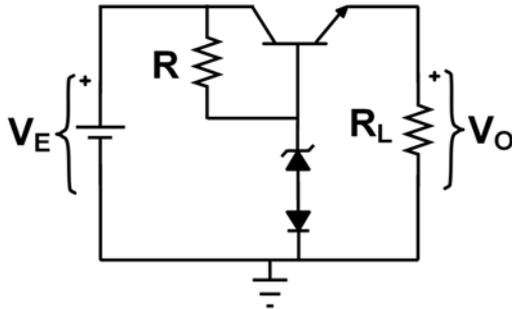
CUESTIÓN 1

Teniendo en cuenta que el transistor PNP que aparece en la figura está polarizado en activa, explique el origen del movimiento de las cargas marcadas con los números del 1 al 5. En base a este movimiento de cargas, explique el efecto Early. **(1 punto)**



EJERCICIO 3

Dado el siguiente circuito:



Transistor NPN:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}; I_{Cmax} = 1 \text{ A}; \beta = 100$$

Resistencia:

$$R = 150 \ \Omega; P_{max} = 600 \text{ mW}$$

Diodo:

$$V_Y = 0.7 \text{ V}; I_{max} = 100 \text{ mA}$$

Diodo Zener:

$$V_Y = 0.8 \text{ V}; V_Z = 12 \text{ V}; I_{min} = 5 \text{ mA}; P_{max} = 600 \text{ mW}$$

Calcular:

- El valor de la tensión de salida para una tensión de entrada $V_E = 15 \text{ V}$. **(0.5 puntos)**
- El valor de la resistencia de carga R_L cuando circula por el transistor su corriente de colector máxima ($V_E = 15 \text{ V}$). **(0.5 puntos)**
- Con esa resistencia de carga obtenida, calcular la tensión de entrada mínima y máxima sin sobrepasar ningún dato característico del diodo zener. **(0.5 puntos)**
- Comprobar que no se supera la potencia máxima de la resistencia y la corriente máxima del diodo dentro del rango de tensión de entrada calculado. **(0.25 puntos)**
- La potencia máxima del transistor ($V_{CE} \times I_C$) dentro de ese rango de tensión de entrada. **(0.25 puntos)**

CUESTIÓN 2

Sean dos bloques de iguales dimensiones A y B de un material semiconductor base de Germanio, calcule la concentración de portadores a temperatura ambiente (300 K) y la posición del nivel de Fermi para cada bloque, sabiendo:

- El bloque A no tiene impurezas.
- El bloque B tiene un dopaje homogéneo con impurezas donadoras ($N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

¿Qué temperatura máxima se deriva de la siguiente desigualdad para el bloque dopado?

$$\text{Concentración de portadores mayoritarios} > 100 n_i$$

Datos: $N_C = 1.02 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_V = 5.64 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $E_g = 0.67 \text{ eV}$, $k = 86.2 \times 10^{-6} \text{ eV/K}$

$n_i = 1.79 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ para $T = 300 \text{ K}$

(1 punto)

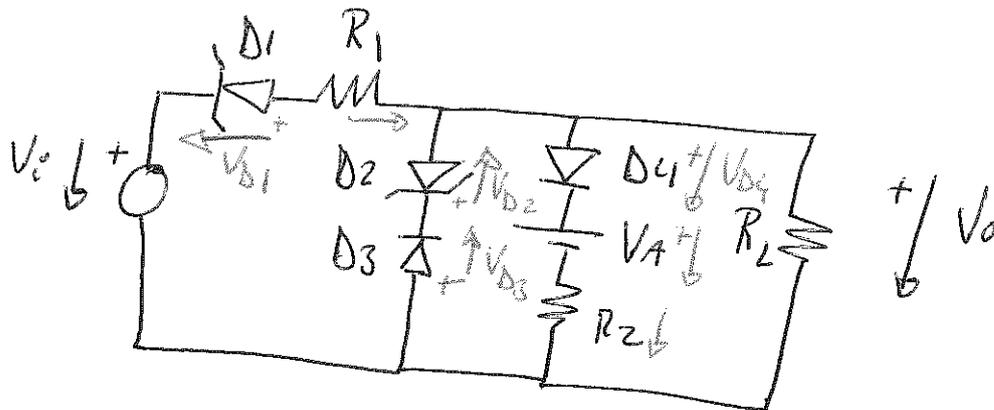
Describe:

- La situación de equilibrio termodinámico que se alcanza si se ponen en contacto los dos bloques descritos.
- La dinámica que ocurre desde que se ponen en contacto hasta que se alcanza el equilibrio termodinámico.

(1 punto)

Ejercicio 1

$$V_A = 8.5V \quad V_i \in (-\infty, 16] \\ V_\gamma = 0.7V \quad |V_Z| = 3.2V$$



LIMITE DE CONDUCCIÓN DE LOS DIODOS

$$D1 \quad I_{D1} = 0 \quad V_i + V_{D1} = \cancel{I_{D1} R_1} + V_o \Rightarrow V_{D1} = V_o - V_i$$

$$\text{Si } V_{D1} = V_o - V_i \geq V_\gamma \Rightarrow D1 \text{ on}$$

$$\text{Si } V_{D1} = V_o - V_i \leq -V_Z \Rightarrow D1 \text{ ruptura}$$

$$\text{Si } -V_Z < V_o - V_i < V_\gamma \Rightarrow D1 \text{ off}$$

$D2$ y $D3$. Para tener corriente en esta rama, los dos diodos deben conducir, $D2$ en ruptura y $D3$ en directa.

$$V_o + V_{D3} + V_{D2} = 0 \Rightarrow$$

$$V_{D3} + V_{D2} = -V_o \geq V_\gamma + V_Z \Rightarrow V_o \leq -(V_\gamma + V_Z) \\ V_o \leq -3.9V$$

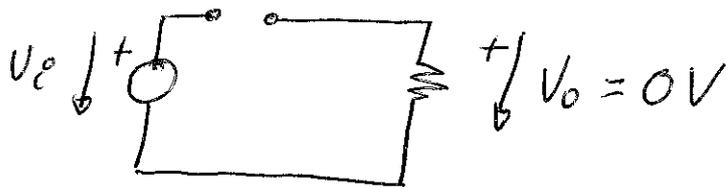
$D4$ en limite de conducción $I_{D4} = 0$

$$V_{D4} + V_A + \cancel{I_{D4} R_2} = V_o \Rightarrow V_{D4} = V_o - V_A$$

$$\text{Si } V_{D4} = V_o - V_A \geq V_\gamma \Rightarrow V_o \geq V_\gamma + V_A = 9.2V \quad D4 \text{ on}$$

$$\text{Si } V_o < 9.2V \quad D4 \text{ off}$$

Suponemos todos D off



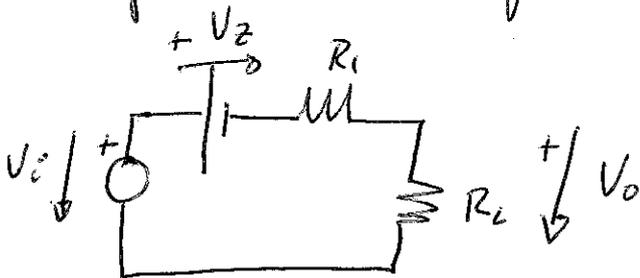
Comprobamos

$$D_1 \text{ off si } -3,2 < V_o - V_i \leq 0,7V \Rightarrow -0,7 < V_i < 3,2$$

$$D_3 \text{ y } D_2 \text{ off si } V_o > -3,9V \quad \text{o.k.}$$

$$D_4 \text{ off si } V_o < 9,2V \quad \text{o.k.}$$

Suponemos D_1 ruptura D_2, D_3, D_4 off $V_i \geq 3,2V$



$$\left. \begin{aligned} V_i &= V_Z + I(R_1 + R_L) \\ V_o &= IR_L \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$I = \frac{V_i - V_Z}{R_1 + R_L} \Rightarrow V_o = (V_i - V_Z) \frac{R_L}{R_1 + R_L}$$

$$V_o = \frac{V_i - 3,2}{2}$$

Comprobamos

$$D_1 \text{ ruptura si } V_o - V_i \leq -3,2 \Rightarrow \frac{V_i}{2} - V_i - 1,6 \leq -3,2$$

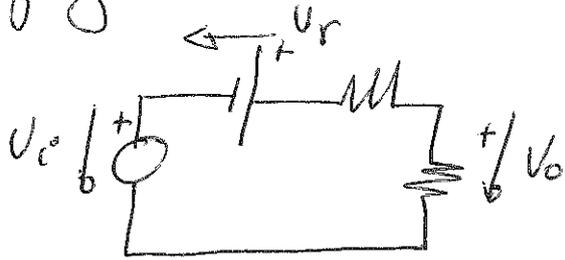
$$D_3, D_2 \text{ off si } V_o \geq -3,9 \quad \Downarrow \quad V_i \geq 3,2 \text{ o.k.}$$

$$\Downarrow \quad \frac{V_i}{2} - 1,6 \geq -3,9 \Rightarrow V_i \geq -4,6 \text{ o.k.}$$

$$D_4 \text{ off si } V_o < 9,2V \Rightarrow \frac{V_i}{2} - 1,6 < 9,2 \Rightarrow \boxed{V_i > 21,6 \text{ D}_4 \text{ on}}$$

D_4 nunca entra en conducción en el intervalo $(-\infty, 6.6]$

Supongo $V_i \leq -0,7$ D_1 on, D_2, D_3, D_4 off



$$V_i + V_D = 2IR \Rightarrow I = \frac{V_i + V_D}{2R}$$

$$V_o = IR$$

$$V_o = \frac{V_i + V_D}{2} = \frac{V_i}{2} + 0,35$$

Compruebo

$$D_1 \text{ on} \Rightarrow V_o - V_i \geq 0,7 \Rightarrow \frac{V_i}{2} + 0,35 - V_i \geq 0,7$$

\Downarrow

$$V_i \leq -0,7 \text{ o.k.}$$

$$D_3, D_2 \text{ off} \Rightarrow V_o \geq -3,9 \Rightarrow \frac{V_i}{2} + 0,35 \geq -3,9$$

\Downarrow

$$V_i \geq -8,5$$

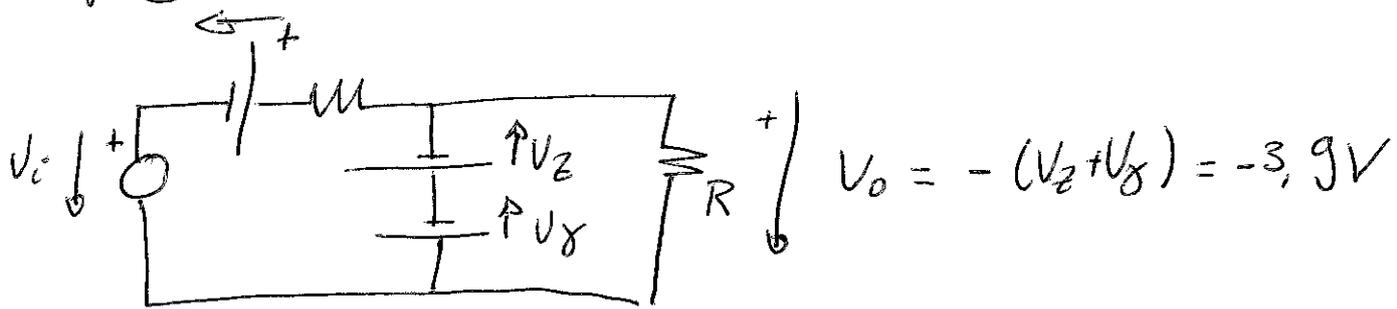
$$\boxed{V_i < -8,5} \quad D_3, D_2 \text{ on}$$

$$D_4 \text{ off} \Rightarrow V_o < 9,2 \Rightarrow \frac{V_i}{2} + 0,35 < 9,2$$

\Downarrow

$$V_i < 17,7 \text{ o.k.}$$

Supongamos $V_i < -8,5$ D_1, D_3 on D_2 ruptura



Comprobamos

$$D_1 \text{ on} \Rightarrow V_o - V_i \geq 0,7 \Rightarrow -3,9 - V_i \geq 0,7$$

$$\Downarrow$$

$$V_i \leq -4,6 \text{ o.k.}$$

$$D_2 \text{ rup. } D_3 \text{ on} \Rightarrow -3,9 \geq -3,9 \text{ o.k.}$$

$$D_4 \text{ off} \Rightarrow V_o < 9,2 \Rightarrow -3,9 < 9,2 \text{ o.k.}$$

RESUMEN

$$-\infty < V_i \leq -8,5 \quad D_1, D_3 \text{ on } D_2 \text{ ruptura } D_4 \text{ off}$$

$$V_o = -3,9V$$

$$-8,5 \leq V_i \leq -0,7 \quad D_1 \text{ on resto off}$$

$$V_o = \frac{V_i}{2} + 0,35$$

$$-0,7 < V_i < 3,2 \quad \text{Todos } D \text{ off}$$

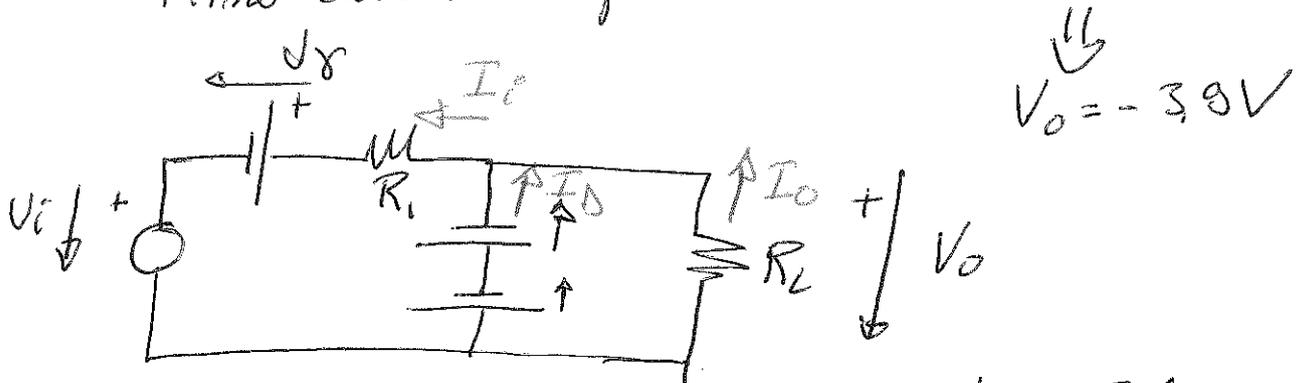
$$V_o = 0$$

$$3,2 \leq V_i < 16 \quad D_1 \text{ ruptura, resto off}$$

$$V_o = \frac{V_i - 3,2}{2}$$

En el caso de que se estudie la evolución de los diodos partiendo de $V_i = -\infty$:

Primer caso: Suponemos D_1, D_3 on D_2 ruptura



Como $I_e = I_D + I_o$ y $I_o = -\frac{V_o}{R_L} = \frac{3.9}{R_L} = \text{cte}$

Cuando V_i aumenta su valor, I_e bajará. Puesto que

$$V_o + V_\gamma + I_e R_1 = V_o$$

$$I_e = \frac{V_o - V_i - V_\gamma}{R_1}$$

I_o es cte., será I_D la que bajará de valor.

Esto nos indica que cuando V_i aumenta llegará a un valor que hará: $I_D = 0 \Rightarrow I_o = I_e$ D_3, D_2 off

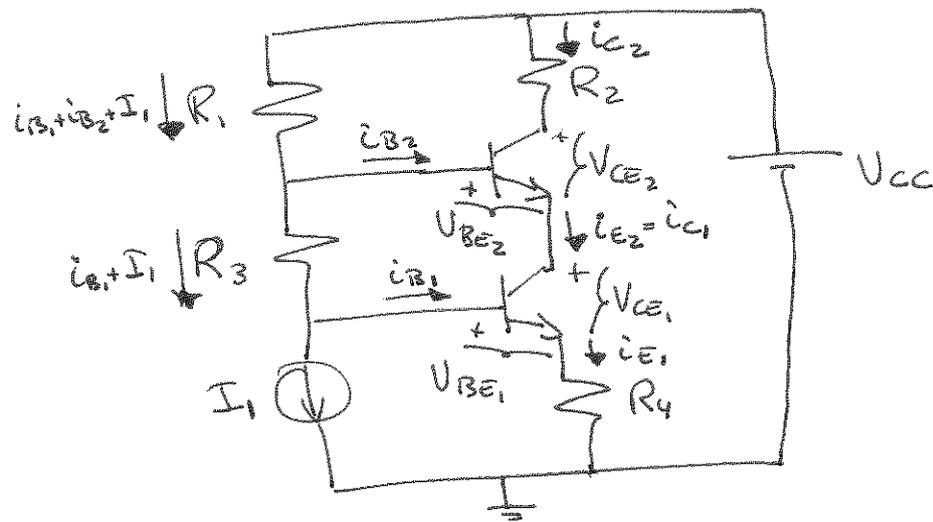
$$\frac{V_o - V_i - V_\gamma}{R_1} = -\frac{V_o}{R_L}$$

$$\boxed{V_i = 2V_o - V_\gamma = -8.5V}$$

Limite de conducción de los diodos D_3, D_2

El resto del planteamiento es igual.

② Pto. Polarización



Supongo ambos en activa:

$$i_{c2} = \beta i_{B2} \quad i_{E1} = \beta i_{B1}$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7V$$

$$V_{CE1} > 0.2V$$

$$V_{CE2} > 0.2V$$

MALLA B-E ①

$$V_{CC} = (I_1 + i_{B1} + i_{B2}) R_1 + (I_1 + i_{B1}) R_3 + V_{BE1} + i_{E1} R_4$$

$$i_{E1} = (\beta + 1) i_{B1}$$

$$i_{E2} = i_{C1} \Rightarrow (\beta + 1) i_{B2} = \beta i_{B1}$$

$$V_{CC} - I_1 (R_1 + R_3) - V_{BE1} = \left(i_{B1} + \frac{\beta}{\beta + 1} i_{B1} \right) R_1 + i_{B1} R_3 + (\beta + 1) i_{B1} R_4$$

$$\Rightarrow i_{B1} = 50.6 \mu A \quad \left\{ \begin{array}{l} i_{C1} = \beta i_{B1} = 10.12 \text{ mA} \\ i_{E1} = (\beta + 1) i_{B1} = 10.17 \text{ mA} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow i_{E2} = i_{C1} = 10.12 \text{ mA} \quad \left\{ \begin{array}{l} i_{B2} = \frac{i_{E2}}{\beta + 1} = 50.4 \mu A \\ i_{C2} = \beta i_{B2} = 10.07 \text{ mA} \end{array} \right.$$

MALLA B-E ②

$$V_{CC} = (I_1 + i_{B1} + i_{B2}) R_1 + V_{BE2} + V_{CE1} + i_{E1} R_4$$

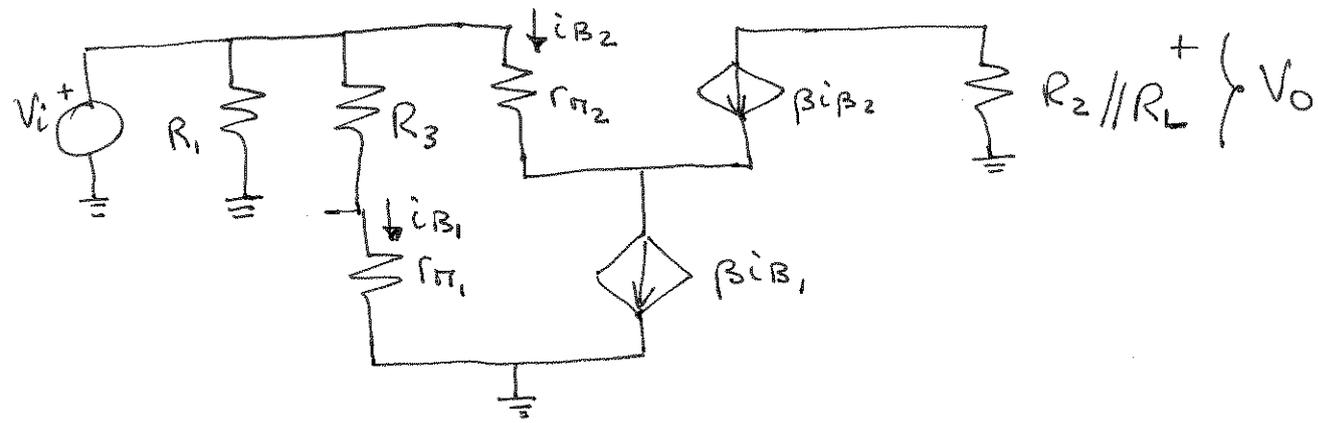
$$\Rightarrow V_{CE1} = 10.9 \text{ V} > 0.2 \quad \checkmark \quad \text{OK en activa}$$

MALLA C-E

$$V_{CC} = i_{C2} R_2 + V_{CE2} + V_{CE1} + i_{E1} R_4$$

$$\Rightarrow V_{CE2} = 2.98 \text{ V} > 0.2 \quad \checkmark \quad \text{OK en activa}$$

b)



c)
$$i_{B1} = \frac{V_i}{R_3 + r_{\pi 1}}$$

$$(\beta + 1) i_{B2} = \beta i_{B1}$$

$$V_o = -\beta i_{B2} (R_2 // R_L)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} &= \frac{-\beta^2}{\beta + 1} \frac{R_2 // R_L}{R_3 + r_{\pi 1}} \end{aligned} \right.$$

$$g_{m1} = \frac{I_{c1}}{V_T} = 392'25 \text{ mA/V} \Rightarrow r_{\pi 1} = \frac{\beta}{g_{m1}} = 509'88 \Omega$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -34'46 \quad \left\{ \begin{aligned} < 0 \Rightarrow \text{inversora} \\ | | > 1 \Rightarrow \text{Amplificadora} \end{aligned} \right.$$

d) Ambos transistores en Activa $\left\{ \begin{aligned} V_{CE1} > 0'2 \text{ V} \\ V_{CE2} > 0'2 \text{ V} \end{aligned} \right.$

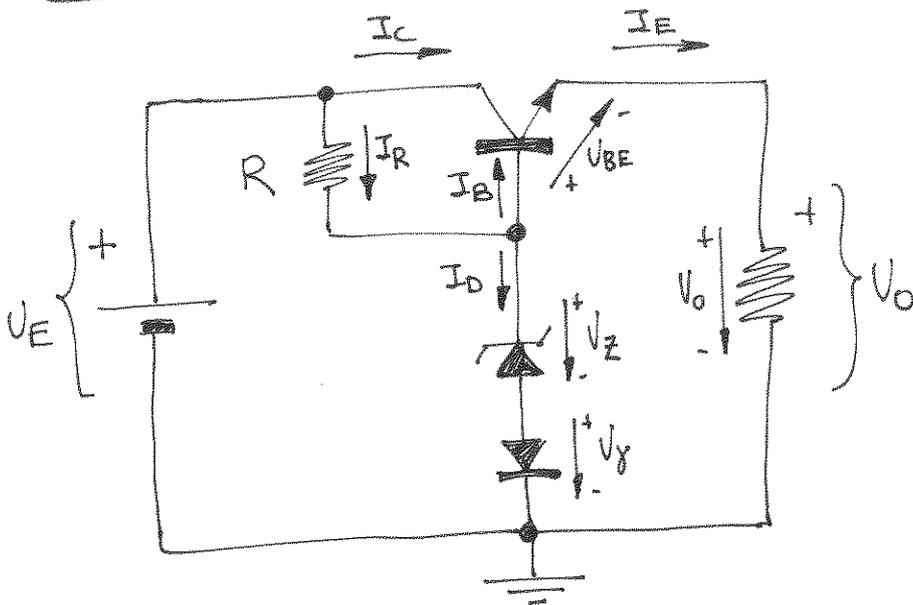
R_2 en malla C-E \rightarrow modifica V_{CE2}

las corrientes son solución de MALLA B-E ①
 V_{CE2} es solución de MALLA B-E ②

$$V_{CE2} = 0'2 \text{ V} \Rightarrow R_2 = 776 \Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{CE1} - V_{CE2} - I_{E1} R_4}{I_{C2}}$$

EJERCICIO 3



- NPN** $\beta = 100$
 $V_{BE} = 0.7V$; $I_{Cmax} = 1A$
- RESISTENCIA**
 $R = 150\Omega$; $P_{max} = 600mW$
- DIODO**
 $V_\gamma = 0.7V$; $I_{max} = 100mA$
- ZENER**
 $V_\gamma = 0.8V$; $V_Z = 12V$
 $I_{min} = 5mA$; $P_{max} = 600mW$

a) $V_o = V_Z + V_\gamma - V_{BE} = 12 + 0.7 - 0.7 = 12V$

b) Suponemos ACTIVA: $I_{Cmax} = 1A \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} = 10mA \Rightarrow I_E = I_C + I_B = 1.01A$

$R_L = \frac{V_o}{I_E} = \frac{12V}{1.01A} = 11.88\Omega$

Comprobamos ACTIVA: $\left\{ \begin{array}{l} V_{CE} = V_C - V_E \\ V_C = V_E = 15V \\ V_E = V_o = 12V \end{array} \right\}$
 $V_{CE} = 3V$

c) $V_{Emin} = V_{Rmin} + V_Z + V_\gamma$; $V_{Rmin} = I_{Rmin} \cdot R$; $I_{Rmin} = I_B + I_{Dmin}$

$I_{Dmin} = I_{Zmin} = 5mA \Rightarrow I_{Rmin} = 10mA + 5mA = 15mA \Rightarrow V_{Rmin} = 2.25V$

$V_{Emin} = 2.25V + 12V + 0.7V = 14.95V$

$V_{Emax} = V_{Rmax} + V_Z + V_\gamma$; $V_{Rmax} = I_{Rmax} \cdot R$; $I_{Rmax} = I_B + I_{Dmax}$

$I_{Dmax} = \frac{P_{max\ zener}}{V_Z} = \frac{600mW}{12V} = 50mA \Rightarrow I_{Rmax} = 10mA + 50mA = 60mA$

$V_{Rmax} = 9V \Rightarrow V_{Emax} = 9V + 12V + 0.7V = 21.7V$

d) $P_{maxR} = V_{Rmax} \cdot I_{max} = 9V \cdot 60mA = 0.54W < 600mW$

$I_{max\ DIODO} = 100mA < I_{max\ ZENER} = 50mA$ LIMITA LA I del ZENER

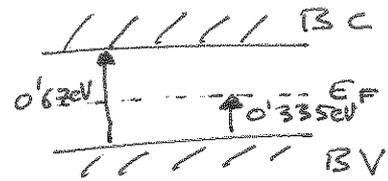
e) $P_{max\ TRANSISTOR} = V_{CEmax} \cdot I_{Cmax}$; $V_{CEmax} = V_{Emax} - V_o = 21.7 - 12 = 9.7V$

$P_{max} = 9.7V \cdot 1A = 9.7W$

C2/ Bloque A \Rightarrow sin impurezas \equiv intrínseco

$$n_0 = p_0 = n_i = 1.79 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

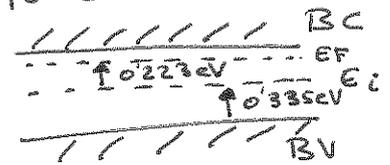
$$E_f = E_i = \frac{E_g}{2} = 0.335 \text{ eV}$$



Bloque B \Rightarrow Dopaje tipo N con $N_D \gg n_i$

$$\Rightarrow n_0 \approx N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 3.2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$E_f - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} = 0.223 \text{ eV}$$



Cumple $\left\{ \begin{array}{l} \text{más cerca de BC (coherente con dopaje N)} \\ \text{dentro de la banda prohibida} \end{array} \right. \quad \checkmark$

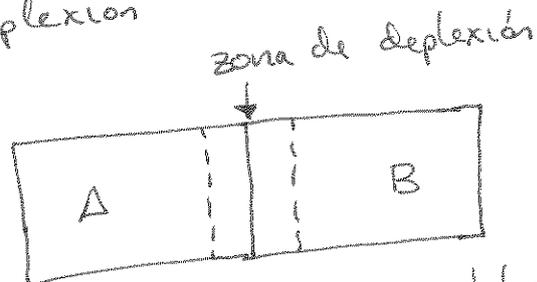
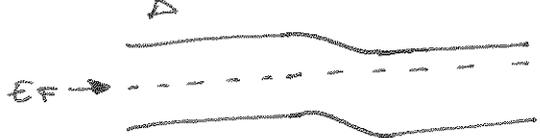
portadores mayoritarios en bloque B $\Rightarrow e^-$ ($n_0 > p_0$)

$$n_0 > 100 n_i \Rightarrow 10^{17} > 100 \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$-8.93 > -\frac{E_g}{2kT} \Rightarrow T < 4350 \text{ K}$$

Al poner los bloques en contacto se alcanza una situación de equilibrio donde:

- Un único nivel de Fermi
- Existe barrera de potencial entre zonas A-B
- Aparece zona de deplexión
- Corriente total nula



La dinámica que lleva a esta situación de equilibrio es:

- Primero se produce difusión por gradiente de concentración de portadores (e^- de B a A, h de A a B)
- El movimiento de portadores genera una descompensación de carga que provoca un campo eléctrico en la zona de deplexión.
- El campo eléctrico genera una corriente de arrastre que compensa la difusión.