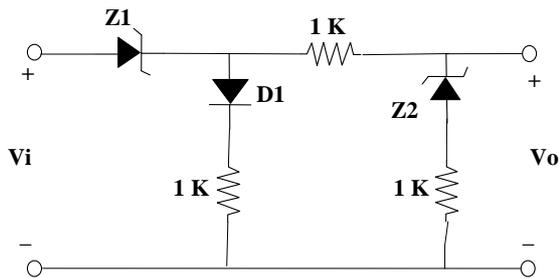


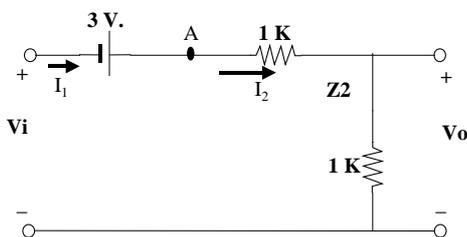
EJERCICIO 1 (Diciembre 2007)

Dado el circuito de la figura donde el zener Z1 tiene una tensión zener $V_{Z1} = 3\text{ V}$, y el zener Z2 tiene una tensión zener $V_{Z2} = 6\text{ V}$, calcular:



(1,5) a) Característica de transferencia del circuito analíticamente y dibujar la gráfica (suponer D1, Z1 y Z2 diodos ideales).

Para tensiones muy negativas Z1 regula (zener), D1 está en corte y Z2 está polarizado en directa. Por lo tanto para tensiones V_i muy negativas ($-\infty < V_i \leq V_x$) el circuito equivalente sería:



Calculamos V_o : $I_1 = I_2$; $V_i = -3V + I_1 \cdot (1K + 1K) \Rightarrow I_1 = \frac{V_i + 3V}{2K}$;

$$V_o = I_1 \cdot 1K = \frac{V_i + 3V}{2K} \cdot 1K = \frac{V_i + 3V}{2}$$

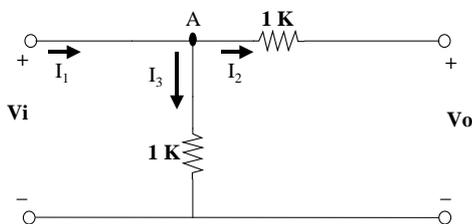
Esta situación se mantendrá hasta una cierta tensión V_x que no será suficiente para polarizar a Z1 en regulación y el zener quedaría polarizado en inversa en su zona de corte (no regularía) y la corriente I_1 sería nula.

$$I_1 = \frac{V_i + 3V}{2K} = 0 \Rightarrow V_i = -3V.$$

Para tensiones mayores a $-3V$ ($-3V \leq V_i \leq V_x$) Z1 estaría en corte y por lo tanto D1 y Z2 estarían también en corte. En esta situación $V_o = 0V$.

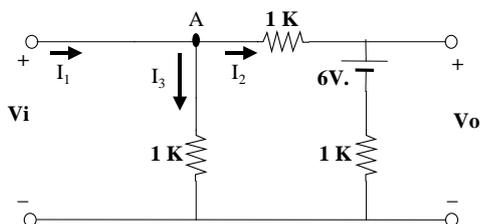
Esta situación se mantendrá hasta que el zener Z1 se polariza en directa. Por lo tanto Z1 estará en corte para $-3V \leq V_i \leq 0V$.

Para $0V \leq V_i \leq V_x$ se estaría en una nueva situación donde Z1 conduce, D1 conduce y Z2 en corte. El circuito equivalente es:



En esta situación $V_o = V_A = V_i$.

Esta situación se mantiene hasta que Z2 empiece a regular que será cuando $V_A \geq V_{Z2}$. Como $V_A = V_i$ entonces Z2 empieza a regular para $V_i = 6V$, siendo el circuito equivalente de esta nueva situación el siguiente:



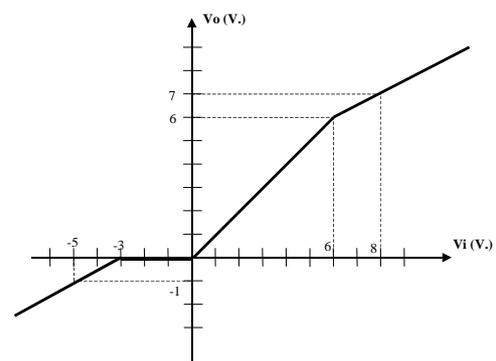
Analizando este circuito:

$$V_o = 6V + I_2 \cdot 1K;$$

$$I_2 = \frac{V_i - 6V}{2K} \Rightarrow V_o = 6V + \frac{V_i - 6V}{2K} \cdot 1K \Rightarrow V_o = \frac{V_i}{2} + 3V$$

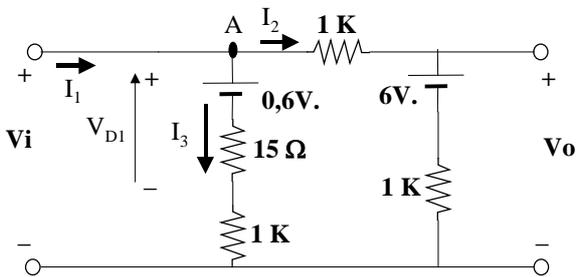
Esta situación se mantiene para $6V \leq V_i < \infty$.

$V_o = f(V_i) = \begin{cases} \frac{V_i + 3V}{2} & -\infty < V_i \leq -3V. \\ 0V & -3V \leq V_i \leq 0V. \\ V_i & 0V \leq V_i \leq 6V. \\ \frac{V_i}{2} + 3V & 6V \leq V_i < \infty \end{cases}$	$\frac{V_i + 3V}{2}$	$-\infty < V_i \leq -3V.$
	$0V$	$-3V \leq V_i \leq 0V.$
	V_i	$0V \leq V_i \leq 6V.$
	$\frac{V_i}{2} + 3V$	$6V \leq V_i < \infty$



(0,5) b) Potencia disipada por el diodo D1 cuando en la entrada del circuito se aplica una tensión $V_i = 10\text{ V}$ (suponer Z1 y Z2 ideales, y para D1 los valores siguientes: $V_f = 0,6\text{ V}$, $R_f = 15\ \Omega$, $R_r = 100\text{ M}\Omega$)

Para $V_i = 10\text{ V}$ la situación de los tres diodos es la siguiente: Z1 en directa, Z2 regula (zona zener) y D1 en directa. El circuito equivalente para $V_i = 10\text{ V}$ sería:



La potencia disipada en el diodo D1 será igual a la corriente que lo atraviesa multiplicada por la caída de tensión entre ánodo y cátodo: $P_{D1} = I_{D1} \cdot V_{D1}$.

$$I_{D1} = I_3 = \frac{V_i - 0,6V}{1K + 0,015K} = \frac{10V - 0,6V}{1,015K} = \frac{9,4V}{1,015K} = 9,26mA$$

$$V_{D1} = 0,6V + I_{D1} \cdot 0,015K = 0,6V + 9,26mA \cdot 0,015K = 0,6V + 0,13V = 0,73V$$

Sustituimos los valores en la fórmula de la potencia y se obtiene:

$$P_{D1} = I_{D1} \cdot V_{D1} = 9,26mA \cdot 0,73V = 6,75mW$$

$$P_{D1} = 6,75\text{ mW}$$

(0,5) c) Potencia disipada por el diodo zener Z2 cuando en la entrada del circuito se aplica una tensión $V_i = 10\text{ V}$ (suponer D1, Z1 y Z2 ideales). Calcular también dicha potencia si se aplica una tensión $V_i = 1\text{ V}$.

Para $V_i = 10\text{ V}$ estamos en la misma situación que en el apartado b. Como el diodo Z2 es ideal entonces la caída de tensión entre cátodo y ánodo es $V_{Z2} = 6\text{ V}$ (Z2 regula) y circula por él una corriente I_2 en sentido inverso.

La potencia disipada en el diodo Z2 será igual a la corriente que lo atraviesa multiplicada por la caída de tensión entre sus terminales: $P_{Z2} = I_{Z2} \cdot V_{Z2}$.

$$I_{Z2} = I_2 = \frac{V_i - 6V}{1K + 1K} = \frac{10V - 6V}{2K} = \frac{4V}{2K} = 2mA; \quad V_{Z2} = 6V$$

Sustituimos los valores en la fórmula de la potencia y se obtiene:

$$P_{Z2} = I_{Z2} \cdot V_{Z2} = 2mA \cdot 6V = 12mW$$

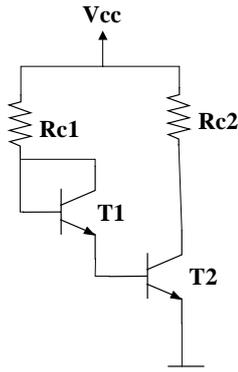
$$V_i = 10V \Rightarrow P_{Z2} = 12\text{ mW}$$

En el caso de $V_i = 1\text{ V}$ se estaría en la situación de que Z1 y D1 están polarizados en directa y Z2 estaría polarizado en inversa en la zona de corte. Por lo tanto al estar Z2 en corte esto implica que no circula corriente por dicho diodo ($I_{Z2} = 0$) y entonces no disipa potencia.

$$V_i = 1V \Rightarrow P_{Z2} = 0\text{ W}$$

EJERCICIO 2 (realizar los cálculos con una precisión de 5 cifras significativas)

En el circuito de la figura



DATOS: $V_{cc} = 20\text{ V}$ $R_{c1} = 100\text{ K}$ $R_{c2} = 2\text{ K}$

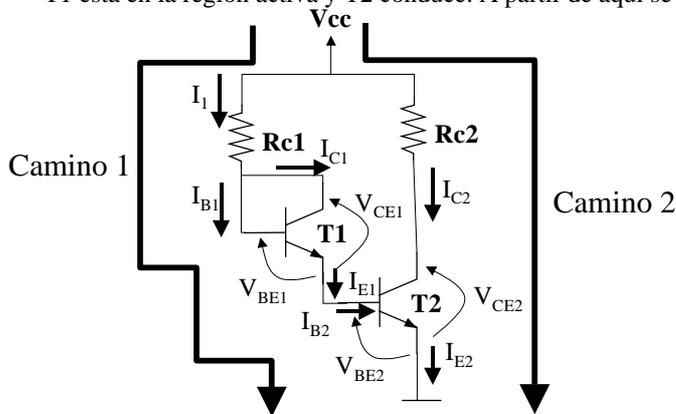
Transistor T1: $V_{BEon} = 0,7\text{ V}$ $V_{CEsat} = 0,2\text{ V}$ $\beta = 100$

Transistor T2: $V_{BEon} = 0,7\text{ V}$ $V_{CEsat} = 0,2\text{ V}$ $\beta = 140$

(1,5) a) Calcular el estado de los transistores y las corrientes en cada una de sus patillas, así como la tensión entre colector y emisor (indicar en la figura el sentido de las corrientes halladas). Poner los resultados en la tabla.

	T1	T2
Estado	ACTIVA	SATURADO
I_C	0,184 mA	9,9 mA
I_B	1,84 μA	0,186 mA
I_E	0,186 mA	10,086 mA
V_{CE}	0,7 V	0,2 V

T1 está en la región activa y T2 conduce. A partir de aquí se pueden realizar los siguientes cálculos:



Analizando el trayecto de circuito marcado como camino 1 en la figura, se tiene que

$$V_{cc} = I_1 \cdot R_{c1} + V_{BE1} + V_{BE2} \quad \text{Como se sabe que T1 y T2 conducen entonces } V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BEon} = 0,7V.$$

$$I_1 = \frac{V_{cc} - V_{BE1} - V_{BE2}}{R_{c1}} = \frac{20V - 0,7V - 0,7V}{100K} = \frac{18,6V}{100K} = 0,186mA$$

$I_1 = I_{C1} + I_{B1}$. Como T1 está en activa se cumple que $I_C = \beta \cdot I_B$. Sustituyendo en la anterior ecuación se obtiene:

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} = \beta_1 \cdot I_{B1} + I_{B1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1} \Rightarrow I_{B1} = \frac{I_1}{\beta_1 + 1}$$

$$I_{B1} = \frac{I_1}{\beta_1 + 1} = \frac{0,186mA}{100 + 1} = 1,84\mu A$$

Conociendo la corriente de base de T1, y como T1 está en activa, se puede saber cual es la corriente de colector de T1:

$$I_{C1} = \beta_1 \cdot I_{B1} = 100 \cdot 1,84\mu A = 0,184mA \quad I_{E1} = I_{C1} + I_{B1} \quad I_{E1} = I_{C1} + I_{B1} = I_1 = 0,186mA$$

Como se puede ver en la figura toda la corriente de emisor del transistor T1 entra en la base del transistor T2, siendo entonces ambas corrientes idénticas:

$$I_{B2} = I_{E1} = 0,186mA$$

$$V_{CE1} = V_{BE1} = V_{BEon} = 0,7V$$

Falta por calcular los valores de las corrientes y tensiones para T2. Este transistor puede estar saturado o en activa. Si se analiza el circuito de salida de T2 (camino 2), se obtiene la siguiente ecuación suponiendo que T2 está saturado:

$$V_{CC} = I_{C2SAT} \cdot R_{C2} + V_{CE2SAT} \Rightarrow I_{C2SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE2SAT}}{R_{C2}}$$

$$I_{C2SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE2SAT}}{R_{C2}} = \frac{20V - 0,2V}{2K} = 9,9mA$$

A partir de este valor se halla la corriente de base mínima necesaria para saturar el transistor T2:

$$I_{B2minSAT} = \frac{I_{C2SAT}}{\beta_2} = \frac{9,9mA}{140} = 70,7\mu A$$

En este caso se tiene que $I_{B2} = 186\mu A$ y como $186\mu A > 70,7\mu A$ el transistor T2 está saturado.

Esto quiere decir que la corriente de colector es la que se calculó antes suponiendo el transistor en saturación:

$$I_{C2} = I_{C2SAT} = 9,9mA$$

Sólo falta por calcular la corriente de emisor (saliente) que será igual a la suma de las corrientes de colector y base (entrantes):

$$I_{E2} = I_{C2} + I_{B2} = 9,9mA + 0,186mA = 10,086mA$$

Como el transistor T2 está saturado entonces la tensión entre colector y emisor será directamente igual al valor de dicha tensión en saturación que se da como dato del problema:

$$V_{CE2} = V_{CESAT} = 0,2V$$

(1) **b)** Calcular el valor mínimo del resistor Rc2 que satura al transistor T2

La corriente de base de T2 es igual a 0,186 mA. Por lo tanto si T2 estuviera en activa la corriente de colector sería:

$$I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2} = 140 \cdot 0,186mA = 26,04mA$$

En este caso y analizando el circuito de salida de T2 (camino 2), se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{CC} = I_{C2} \cdot R_{C2} + V_{CE2} \Rightarrow R_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{CE2}}{I_{C2}}$$

Mientras el transistor está en activa la tensión entre colector y emisor V_{CE} es mayor que su valor de saturación (0,2 V). Cuando el transistor se satura el valor de esta tensión es igual a 0,2 V. En la ecuación anterior se puede ver que cuanto mayor sea la resistencia R_{C2} menor tiene que ser el valor de V_{CE} . Por lo tanto si se aumenta constantemente el valor de la resistencia, va a llegar un momento en que se alcance un valor de tensión $V_{CE} = 0,2$ V y a partir de ese instante el transistor T2 estaría saturado. Ese valor de resistencia se puede calcular a partir de la ecuación anterior aplicándola para dicho instante en el que el T2 entra en saturación ($V_{CE2} = 0,2$ V):

$$R_{C2SAT} = \frac{V_{CC} - V_{CE2SAT}}{I_{C2}} = \frac{20V - 0,2V}{26,04mA} = 0,760K = 760\Omega$$

$$R_{C2sat} > 760 \Omega$$

(0,25) **c)** Calcular el valor mínimo que tendría que tener Rc1 para saturar el transistor T1

Al estar cortocircuitados el colector y la base del transistor T1, la tensión entre base y colector es siempre cero lo que implica que la unión base-colector no puede estar nunca polarizada en directa ya que para ello $V_{BC1} > 0,5V$ y esto nunca se cumple porque $V_{BC1} = 0V$. Para que se sature un transistor es necesario que las uniones emisor-base y base-colector estén ambas polarizadas en directa, por lo que el transistor T1 no se puede saturar nunca.

T1 siempre en activa

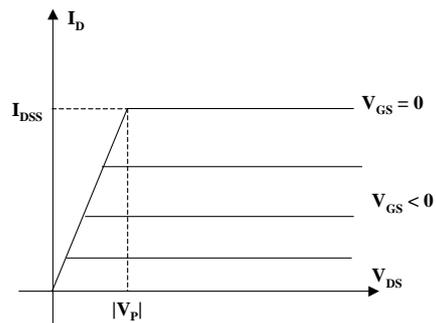
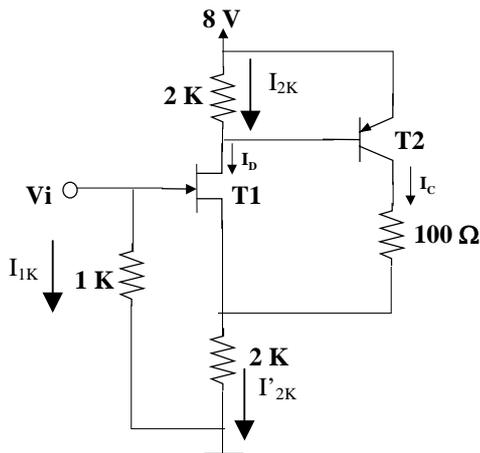
(0,25) **d)** Si sustituimos el transistor T1 por un transistor pnp, ¿cuál sería el estado de los transistores con esta nueva situación?

Al ser $V_{CC} = +20V$, al sustituir T1 por un transistor PNP esta tensión positiva polarizaría a la unión de emisor de dicho transistor en inversa, lo que supondría que T1 estaría en corte. Al estar T1 en corte, todas sus corrientes son nulas y por lo tanto $I_{B2} = I_{E1} = 0$, por lo que las corrientes en T2 también serían todas nulas y este transistor también estaría en corte.

T1 en corte
T2 en corte

EJERCICIO 3 (realizar los cálculos con una precisión de 5 cifras significativas)

En el circuito de la figura:



CARACTERÍSTICA IDEAL DEL JFET

DATOS: $|V_p| = 8 \text{ V}$ $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$ Cuando el FET está saturado $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{|V_{GS}|}{|V_p|} \right)^2$
 $|V_{BEon}| = 0,7 \text{ V}$ $|V_{CEsat}| = 0,2 \text{ V}$ $\beta = 100$

(2,5) Calcular el valor de las corrientes I_D e I_C e indicar en que estado están los transistores si no se aplica tensión en la entrada ($V_i = 0 \text{ V}$). Se puede despreciar la corriente I_B y la característica del JFET se puede aproximar por tramos lineales.

Se supone que T1 está saturado y T2 en activa:

$$I_{1K} = \frac{V_i}{1K} = \frac{0}{1K} = 0 \qquad I_B \approx 0$$

$$I_{2K} = \frac{V_{EB}}{2K} = \frac{0,7V}{2K} = 0,35mA$$

$$I_D = I_{2K} + I_B \approx I_{2K} = 0,35mA$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{|V_{GS}|}{|V_p|} \right)^2 \Rightarrow 0,35mA = 5mA \left(1 - \frac{|V_{GS}|}{8V} \right)^2 \Rightarrow |V_{GS}|^2 - 16 \cdot |V_{GS}| + 59,52 = 0$$

Se resuelve la ecuación de 2º grado y se obtienen dos soluciones: $|V_{GS}| = 10,11V$
 $|V_{GS}| = 5,88V$

La solución de 10,11V no es válida ya que esta tensión es mayor que $|V_p|$ y esto implicaría que el transistor T1 estaría en corte. Por lo tanto la única solución coherente con la suposición realizada anteriormente de que el transistor T1 está en saturación es la de 5,88V.

Como el transistor T1 es un FET de canal N, se tiene que $V_{GS} = -5,88V$

$$V_{DS} = 8V - V_{EB} + V_{GS} = 8V - 0,7V - 5,88V = 1,42V$$

Ahora se tienen que comprobar las suposiciones anteriores:

Si T1 saturado $\Rightarrow |V_{DS}| \geq ||V_p| - |V_{GS}||$ \Rightarrow no se cumple la condición de saturación por lo que la suposición es falsa y los resultados obtenidos no son correctos.

Se supone que T1 en óhmica y T2 en activa:

$$r_{DS} = \frac{|V_P|}{I_{DSS}} = \frac{8V}{5mA} = 1,6K$$

$$8V = I_D(2K + r_{DS}) + I'_{2K} \cdot 2K = I_D \cdot 3,6K + I'_{2K} \cdot 2K$$

$$I'_{2K} = \frac{8V - 0,35mA \cdot 3,6K}{2K} = 3,37mA$$

$$I_C + I_D = I'_{2K} \Rightarrow I_C = I'_{2K} - I_D = 3,37mA - 0,35mA = 3,02mA$$

Ahora se tienen que comprobar las suposiciones:

* Comprobar que T1 está en óhmica:

$$0 = V_{GS} + I'_{2K} \cdot 2K \Rightarrow V_{GS} = -I'_{2K} \cdot 2K = -3,37mA \cdot 2K = -6,74V$$

$$V_{DS} = I_D \cdot r_{DS} = 0,56V$$

Si T1 en óhmica $\Rightarrow |V_{DS}| < \|V_P\| - |V_{GS}|$ \Rightarrow se cumple la condición de óhmica por lo que la suposición es correcta.
 $0,56V < 8V - 6,74V = 1,26V$

* Comprobar que T2 está en activa:

$$V_{CE} = -8V + I_C \cdot 100\Omega + I'_{2K} \cdot 2K = -8V + 3,02mA \cdot 0,1K + 3,37mA \cdot 2K = -0,95V$$

Se obtiene que V_{CE} es negativa y $|V_{CE}| > |V_{CEsat}| = 0,2V$, lo que implica que el transistor T2 está en activa y la suposición es correcta.

Por lo tanto la solución del problema es:

T1 en óhmica
T2 en activa

$I_D = 0,35mA$
$I_C = 3,02 mA$