PROBLEMAS ELECTRÓNICA ANALÓGICA

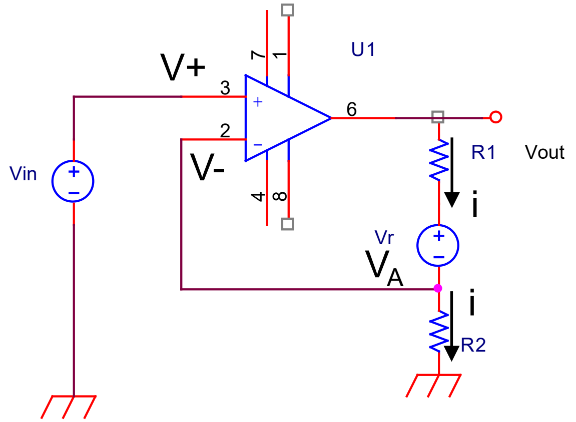
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática (2022/2023)

Problemas

Tema 1. **Amplificador Operacional.**
Tema 2. **Diodo y rectificación.**
Tema 3. **Transistor BJT y FET.**
Tema 4. **Amplificación con transistores.**
Tema 5. **Respuesta en frecuencia.**

Tema 1. Amplificador Operacional (A.O.)

Problema 1. Hallar la función de transferencia del circuito (V_{out} vs. V_{in}).



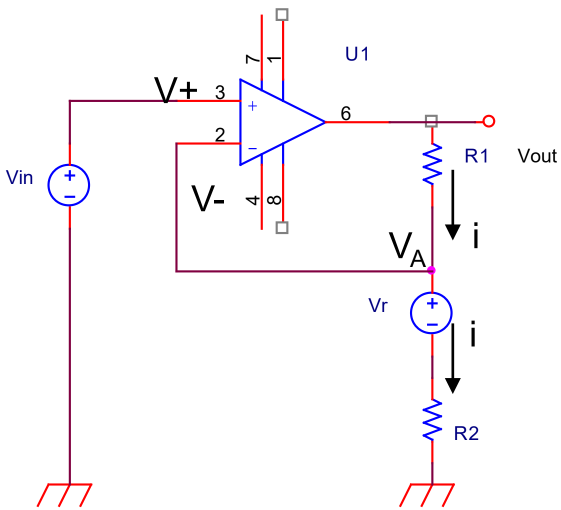
Teniendo en cuenta que no hay corrientes de entrada al AO y que el voltaje en las dos entradas es igual, aplicamos las leyes de Kirchhoff en la malla de entrada y en la de salida (llamamos i a la corriente que pasa por las resistencias).

$$V_+ = V_{in} \rightarrow V_- = V_{in} \rightarrow V_A = V_{in}$$

$$V_{in} = iR_2 \rightarrow i = \frac{V_{in}}{R_2}$$

$$V_{out} = V_{R2} + V_r + V_{R1} = iR_2 + V_r + i_{R1} \rightarrow V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{in} + V_r$$

Problema 2. Hallar la función de transferencia del circuito (vout vs. vin).



El voltaje en las dos entradas (V+, V-) es el mismo
La corriente de entrada es nula

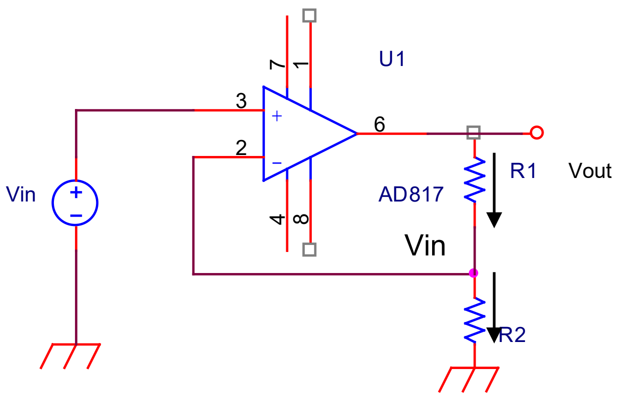
$$V_+ = V_{in} \rightarrow V_- = V_{in} \rightarrow V_A = V_{in}$$

$$V_{in} = V_r + iR_2 \rightarrow i = \frac{V_{in} - V_r}{R_2}$$

$$V_{out} = V_{R2} + V_r + V_{R1} = iR_2 + V_r + i_{R1} \rightarrow V_{out} = \frac{V_{in} - V_r}{R_2} R_2 + V_r + \frac{V_{in} - V_r}{R_2} R_1$$

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{in} + V_r \left(1 - \frac{R_1 + R_2}{R_2}\right) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{in} + V_r \left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

Problema 3. Hallar la función de transferencia del circuito (vout vs. vin).

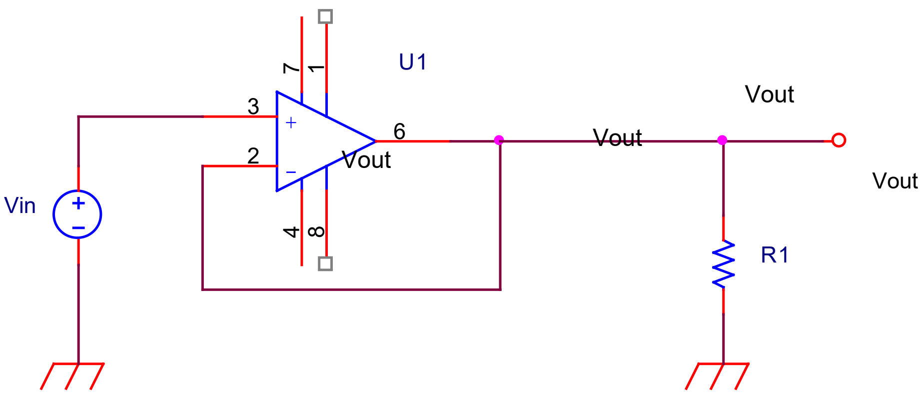


Llamando i a la corriente que circula por las resistencias:

$$v_+ = v_- \Rightarrow V_{in} = iR_2 \Rightarrow i = \frac{V_{in}}{R_2}$$

$$V_{out} = iR_1 + iR_2 \Rightarrow V_{out} = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} V_{in}$$

Problema 4 Suponiendo que el AO de la figura tiene una ganancia en lazo abierto A=2.10^5 hallar vout sabiendo que vin = 3V. Hallar la corriente que pasa por R_1 si ésta vale 10 kΩ.



$$V_{out} = A(v_+ - v_-) = A(V_{in} - V_{out}) \Rightarrow V_{out}(1+A) = AV_{in}$$

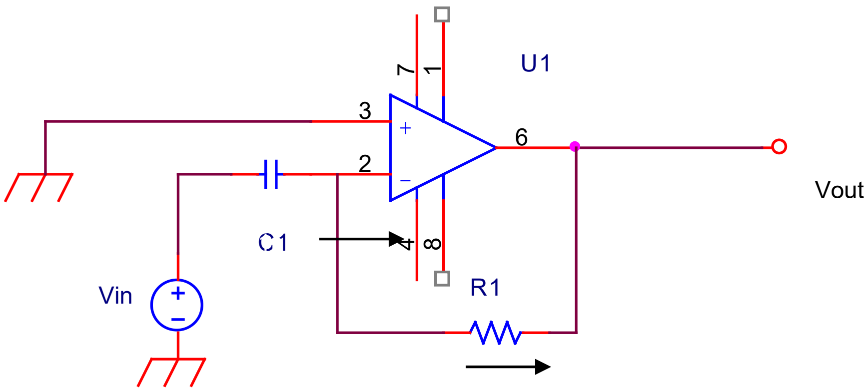
$$\Rightarrow V_{out} = \frac{A}{1+A} V_{in}$$

$$V_{out} = \frac{2x10^5}{1+2x10^5} V_{in} \approx V_{in} = 3V$$

$$I = \frac{V_{out}}{R_1} = \frac{3V}{10\text{k}\Omega} = 0.3\ mA$$

0.999995

Problema 5. Hallar la función de transferencia del circuito de la figura (vout vs. vin).



$$v_+ = v_- = 0$$

$$i_c = i_{R1} \rightarrow \frac{V_{in} - 0}{Z_c} = \frac{0 - V_{out}}{R} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R}{Z_c} = -\frac{R}{\dfrac{1}{j\omega C}} = -j\omega RC$$

Otra forma más genérica de resolverlo

$$V_{out} = 0 - V_R = -iR = -RC\frac{dv_c}{dt}$$

$$i_c = C\frac{dv_c}{dt}$$

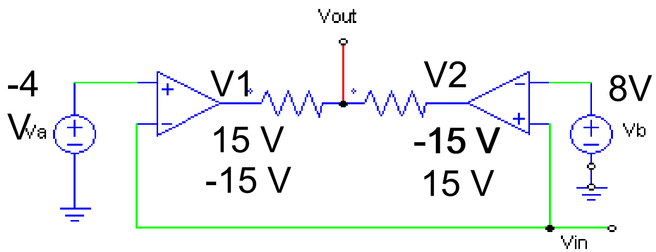
Circuito integrador

$$v_c = V_{in}$$

$$si\ V_{in} = V_o e^{j\omega t} \rightarrow \frac{dv_c}{dt} = j\omega V_o e^{j\omega t} = j\omega V_{in}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{RCj\omega V_{in}}{V_{in}} = -j\omega RC$$

Problema 6. El circuito de la figura es un detector de rango de voltaje. Hallar la función de transferencia del mismo si los voltajes de saturación son +15 V y -15 V. Va= -4 V y Vb=8V.



En este problema no hay realimentación negativa, por tanto los AO estarán saturados a ± 15 V:

$$Si\ V_{+} > V_{-} \rightarrow Vo = +V_{cc}\ (15V)$$
$$Si\ V_{+} < V_{-} \rightarrow Vo = -V_{cc}\ (-15V)$$

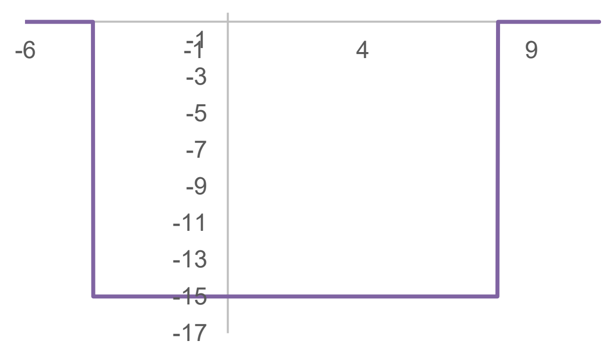
Estudiamos los diferentes casos:

•Si Vin < -4 V→ V1=15 V y V2=-15 V→ Vout=0 V

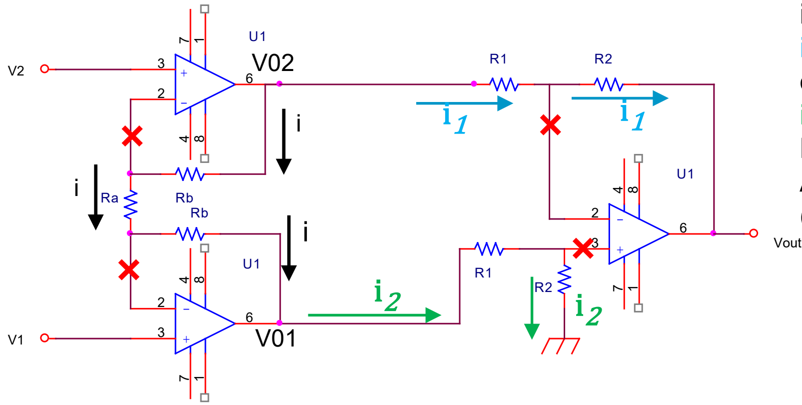
•Si 8>V_{in} > -4 V→ V_1=-15 V y V_2=-15 V→ V_{out} = -15 V

•Si V_{in} > 8 V→ V_1 =-15 V y V_2=15 V →V_{out} = 0 V

La salida es diferente de cero cuando el valor del voltaje de entrada está entre -4 V y 8 V (las fuentes de referencia). El circuito es capaz de detectar este rango de voltaje.



Problema 7. El circuito de la figura es un amplificador de instrumentación. Hallar su función de transferencia.



i circula por R_b, por R_a y por R_b i.
i_1 circula desde la salida del 2º operacional, a la salida del 3er operacional.
i_2 circula desde la salida del AO1 hasta tierra.
Llamaremos v_{01} y v_{02} a las salidas de los AO1 y AO2.
Aplicando las leyes de Kirchhoff a la parte izquierda del circuito (formada por los AO1 y AO2) tenemos que:

$$i = \frac{v_{-2} - v_{-1}}{R_a} = \frac{v_2 - v_1}{R_a}$$

Aplicando cortocircuito virtual (v+=v-)

Como en los operacionales no entra corriente → $i = \frac{V_{02} - V_{01}}{R_b + R_a + R_b} = \frac{V_{02} - V_{01}}{2R_b + R_a} \longrightarrow \frac{V_{02} - V_{01}}{2R_b + R_a} = \frac{v_2 - v_1}{R_a} \rightarrow V_{02} - V_{01} = \frac{v_2 - v_1}{R_a}(2R_b + R_a)$

Si aplicamos las leyes de Kirchhoff a la parte derecha, y teniendo en cuenta que v+=v- :

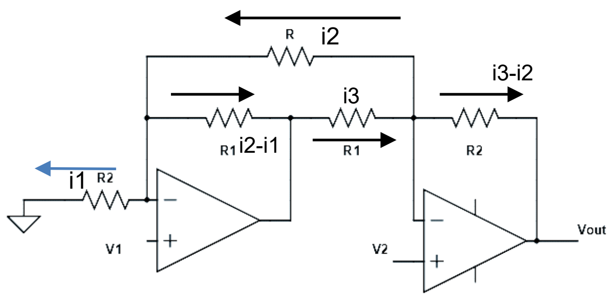
$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \frac{V_{02} - V_{out}}{R_1 + R_2} \\ i_2 &= \frac{V_{01} - 0}{R_1 + R_2} \end{aligned}\right\} V_{02} - i_1 R_1 = V_{01} - i_2 R_1 \rightarrow V_{02} - \frac{V_{02} - V_{out}}{R_1 + R_2} R_1 = V_{01} - \frac{V_{01}}{R_1 + R_2} R_1 \rightarrow (V_{02} - V_{01})\left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) = -V_{out}\frac{R_1}{R_1 + R_2} \rightarrow$$

$$\rightarrow V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_{01} - V_{02})$$

Expresando V_{out} en función de v_1 y de v_2, tenemos que:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_{01} - V_{02}) = \frac{R_2}{R_1}\frac{(R_a + 2R_b)}{R_a}(v_1 - v_2)$$

Problema 8. Hallar la función de transferencia del circuito inferior.



Llamaremos i_1 a la corriente que va desde v_- del AO1 a tierra, i_2 a la corriente que circula por R, de derecha a izquierda, e i_3 a la corriente que circula entre la salida del AO1 y v_- del AO2, atravesando R_1.
Planteamos las siguientes ecuaciones:

$$i_1 = \frac{V_1}{R_2}$$

$$i_2 = \frac{V_2 - V_1}{R}$$

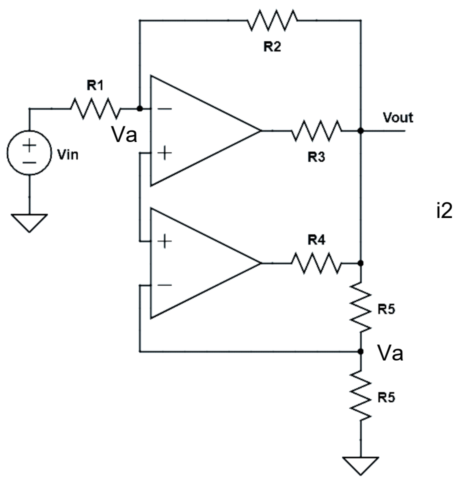
$$V_1 - V_2 = (i_2 - i_1)R_1 + i_3 R_1 \rightarrow i_3 = \frac{V_1 - V_2}{R_1} - (i_2 - i_1)$$

$$v_{out} = V_2 - (i_3 - i_2)R_2 = V_2 - \left[\frac{V_1 - V_2}{R_1} - (i_2 - i_1) - i_2\right]R_2 = V_2 - \left[\frac{V_1 - V_2}{R_1} - 2i_2 + i_1\right]R_2$$

$$v_{out} = V_2 - \left[\frac{V_1 - V_2}{R_1} - 2\frac{V_2 - V_1}{R} + \frac{V_1}{R_2}\right]R_2 = V_2 - V_1 + (V_2 - V_1)\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R}\right)$$

$$v_{out} = (V_2 - V_1)\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{2R_2}{R}\right)$$

Problema 9. Hallar la función de transferencia del circuito inferior.



Empezamos buscando una relación entre el voltaje de salida y el de entrada. El voltaje de salida también se puede expresar de la siguiente forma, en función de i_2:

$$Vin - Vout = i_1(R_1 + R_2) \rightarrow i_1 = \frac{Vin - Vout}{R_1 + R_2}$$

$$Vout = 2i_2R_5 \rightarrow i_2 = \frac{Vout}{2R_5}$$

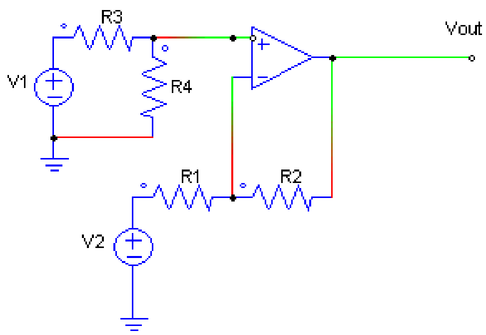
Vamos a utilizar un voltaje intermedio, Va, por simplicidad. Este voltaje no es necesario pero nos ayuda a ver más clara la relación entre las corriente i_1 e i_2.

$$\left.\begin{array}{c} Va = i_2R_5 \\ \\ Vin - Va = i_1R_1 \rightarrow Va = Vin - i_1R_1 \end{array}\right\} \text{Va=Va}$$

$$\frac{Vout}{2}\frac{\cancel{R_5}}{\cancel{R_5}} = Vin - \frac{Vin - Vout}{R_1 + R_2}R_1 \rightarrow Vout\left(\frac{1}{2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$$
$$= Vin\left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$$

$$Vout\left(\frac{R_1 + R_2 - 2R_1}{2(R_1 + R_2)}\right) = Vin\left(\frac{R_1 + R_2 - R_1}{R_1 + R_2}\right) \rightarrow Vout = 2Vin\left(\frac{R_2}{R_2 - R_1}\right)$$

Problema 10. Hallar V_{out} en función de V_1, V_2, y las resistencias del circuito.



Llamando i a la corriente que circula por R_3 y R_4 e i' a la que circula por R_1 y R_2, aplicando las leyes de Kirchhoff tenemos que:

$$V_1 = R_3 i + R_4 i \rightarrow i = \frac{V_1}{R_3 + R_4}$$

$$v_+ = R_4 i = R_4 \frac{V_1}{R_3 + R_4}$$

$$V_2 = R_1 i_2 + R_2 i_2 + v_{out} \rightarrow i_2 = \frac{V_2 - v_{out}}{R_1 + R_2}$$

$$v_- = V_2 - R_1 i_2 = V_2 - R_1 \frac{V_2 - v_{out}}{R_1 + R_2} = \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 v_{out}}{R_1 + R_2}$$

Igualando v_+ con v_- tenemos que:

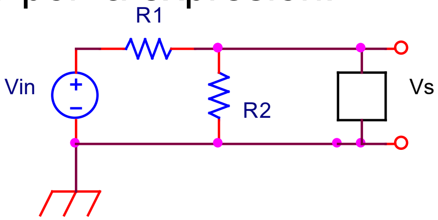
$$v_+ = v_- \rightarrow \frac{R_4 V_1}{R_3 + R_4} = \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 v_{out}}{R_1 + R_2} \rightarrow \frac{v_{out} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_4 V_1}{R_3 + R_4} - \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow v_{out} = V_1 \frac{R_4 (R_1 + R_2)}{(R_3 + R_4) R_1} - V_2 \frac{R_2}{R_1}$$

En el caso particular de que $R_3 = R_1$ y $R_4 = R_2$, tenemos que:

$$\Rightarrow v_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2)$$

Tema 2. Diodo y rectificación

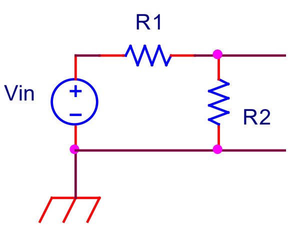
Problema 1. En la figura inferior hay un elemento no lineal cuya característica corriente-voltaje viene dado por la expresión:



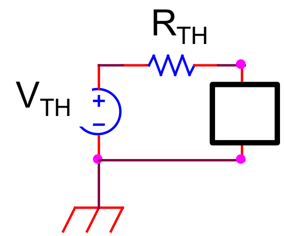
$$I_s = A(v_s - v_t)^2 \;\; si \; v_s > v_t$$
$$I_s = 0 \;\; si \; v_s < v_t$$

Calcular el voltaje que cae en dicho dispositivo si A =1, v_t=0, V_{in} =12 V y R_1= 1 kΩ y R_2 = 1 kΩ

Empezamos calculando el equivalente de Thévenin entre los bornes del elemento no lineal:



$$V_{Th} = \frac{V_{in} R_2}{R_1 + R_2} = 6V$$
$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0{,}5k\Omega$$

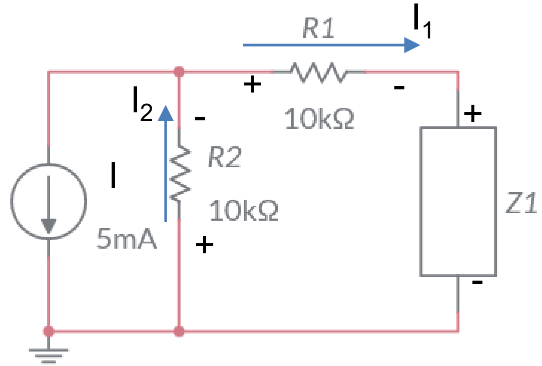


Aplicando Kirchhoff nos queda:

$$V_{Th} = R_{Th} i_s + v_s$$
$$V_{Th} = R_{Th} A(v_s - v_t)^2 + v_s$$

$$6 = 0.5v_s^2 + v_s \rightarrow 0.5v_s^2 + v_s - 6 = 0$$
$$\rightarrow v_s = \frac{-1 \pm \sqrt{1^2 - 4x0.5x(-6)}}{2x0.5} = -1 \pm 3.6 = 2.6 \qquad \rightarrow I_s = A(v_s - v_t)^2 = (2.6)^2 = 6.76\,A$$

Problema 2. Encontrar la recta de carga presentada al elemento desconocido por el circuito resistivo de la figura. I =5 mA, $R_1 = R_2 = 10$ kΩ.

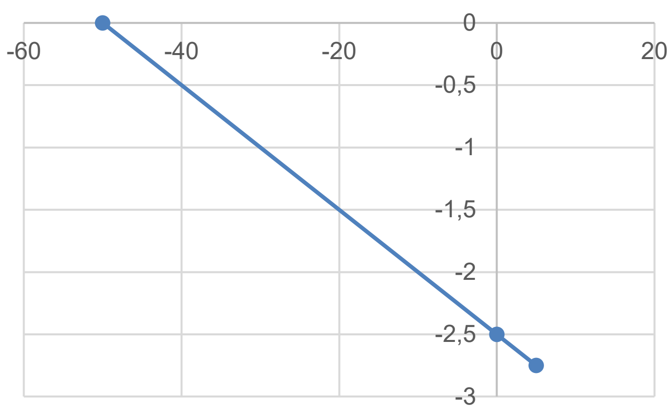


$$I + I_1 = I_2$$

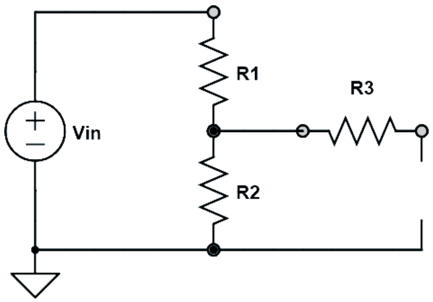
$$V_{R2} + V_{R1} + V_x = 0 \rightarrow R_2(I + I_1) + R_1 I_1 + V_x = 0$$

$$10(5 + I_1) + 10 I_1 + V_x = 0 \rightarrow I_1 = \frac{-V_x - 50}{20} = -\frac{V_x}{20} - 2.5$$

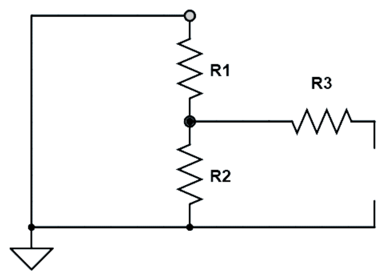
La recta de carga tiene pendiente -1/20=-0,05 y ordenada en el origen -2,5

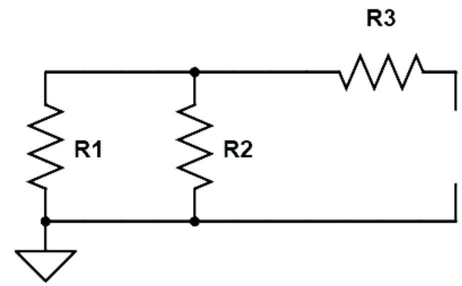


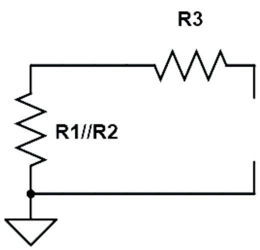
Problema 3 Si el diodo Zéner de la figura tiene un voltaje de activación **de 0,7 V** y un voltaje de **ruptura de 3 V** hallar su punto de trabajo (v_{in} = 12 V, R_1= 1 kΩ, R_2 = 1 kΩ y R_3 = 0.5 kΩ)



Empezamos haciendo un equivalente de Thévenin de toda la parte lineal del circuito (V_{in}, R_1, R_2 y R_3).



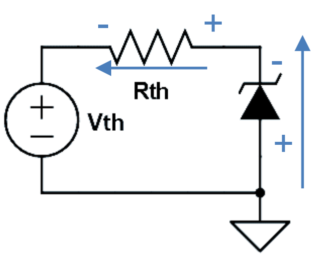




$$V_{Th} = \frac{V_{in}R_2}{R_1 + R_2} = 6V$$

$$R_{Th} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = 1k\Omega$$

Con el circuito equivalente de Thévenin, planeamos la ecuación de de Kirchhoff para obtener la recta de carga: (llamamos v_d al voltaje que cae en el diodo e i_d a la corriente que lo atraviesa)

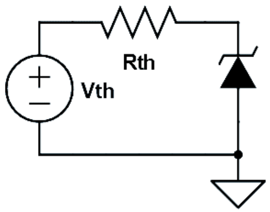


$$V_{Th} + V_{R_{TH}} + V_d = 0$$

$$6 + i_d R_{Th} + V_d = 0$$

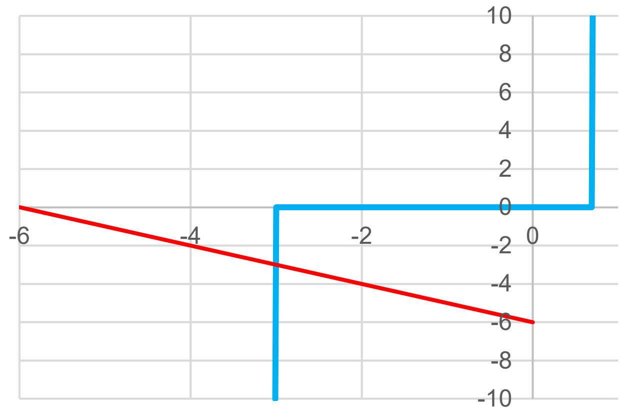
$$i_d = -6 - v_d$$

Resolvemos mediante el método gráfico. Representaremos en una misma gráfica la característica i-v del diodo Zener (usando el modelo sencillo) y la recta de carga (en rojo).
La recta de carga es una recta de pendiente -1 y ordenada en el origen -6.



$$i_d = -6 - v_d$$

Puntos de corte con los ejes: vd=0→id=-6 mA
id=0→vd=-6 V



En el gráfico se observan las dos características y el punto de corte que está en Q: v_d = -3 V, i_d =-3 mA

Resolución numérica. Si el diodo Zener conduce en directa, Vd=0.7 V, si conduce en inversa Vd=-3 V.
Suponemos inversa:

$$i_d = -6 - v_d = -6 - (-3)) = -3\ mA$$

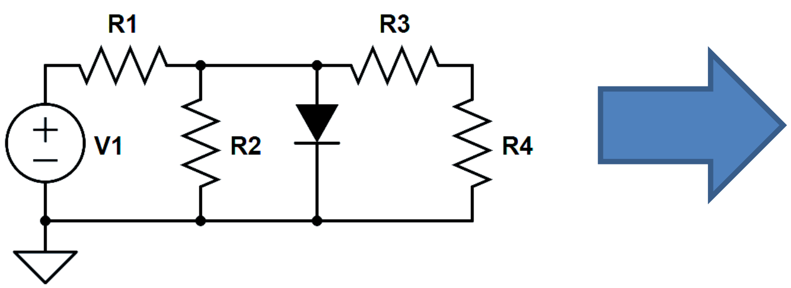
Como la corriente obtenida id<0, la suposición era correcta. Qd=(-3V,-3mA).

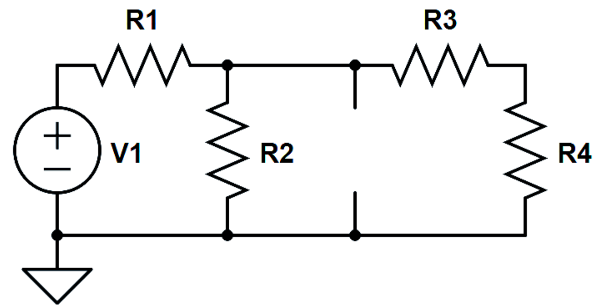
Si hubiéramos supuesto directa:

$$i_d = -6 - v_d = -6 - (0.7) = -6.7\ mA < 0 \rightarrow incorrecto$$

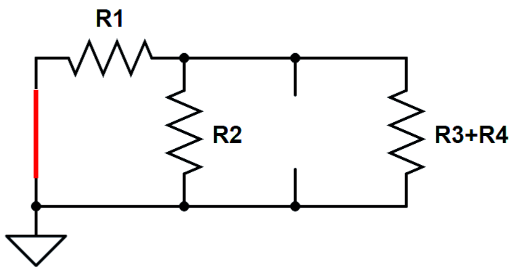
¿Si Vin=4 V?

Problema 4 Encontrar el punto de operación del diodo de la figura. (V_{in} = 12 V, R_1= 10 kΩ, R_2 = 5 kΩ, R_3 = 100 kΩ y R_4 = 50 kΩ)

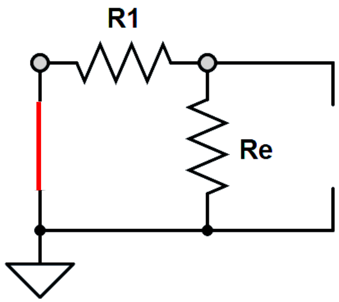


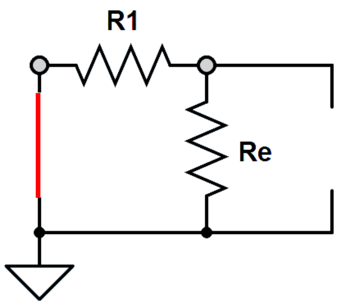


Calculamos Rth: anulamos V1



R_3 y R_4 están en serie y a su vez en paralelo con R_2. Llamaremos R_e a esta resistencia equivalente (R_2 //(R_3+R_4)).



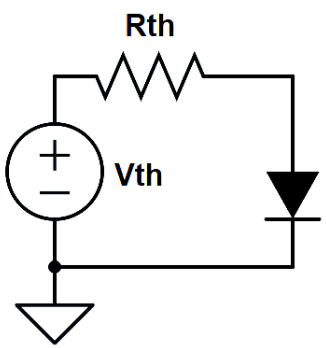


Aquí la resistencia total será el paralelo de R1 con Re.

$$R_e = R_2//(R_3 + R_4) = 5\,//150 = \frac{5 * 150}{5 + 150} = 4.84\ k\Omega$$

$$R_{th} = R_1//R_e = \frac{10 * 4.84}{10 + 4.84} = 3.27\ k\Omega$$

$$V_{th} = \frac{V_{in}R_e}{R_1 + R_e} = 12\,\frac{4.84}{14.84} = 3.91\ V$$



¿Conducirá el diodo? Vth>0.7V→Suponemos que sí:

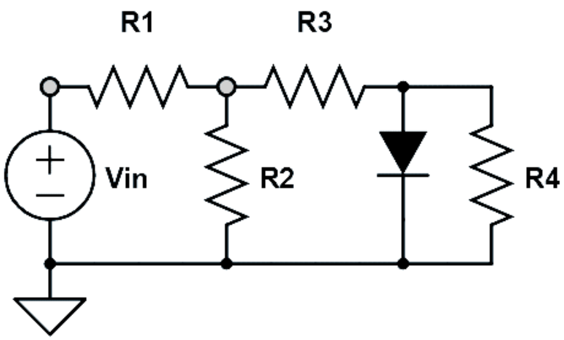
$$V_{th} - V_{Rth} - V_d = 0 = 3.91 - i * 3.27 - V_d = 0$$

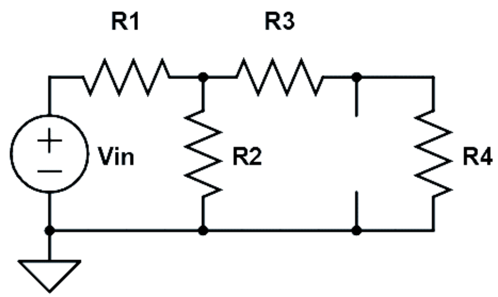
$$3.91 - i * 3.27 - 0.7 = 0 \rightarrow i = \frac{3.91 - 0.7}{3.27} = 0.982\ mA$$

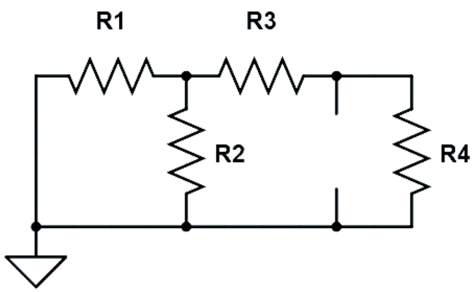
i>0→ Estábamos en lo correcto.

Punto de operación del diodo es Q=(Vd=0.7 V, id=0.982mA).

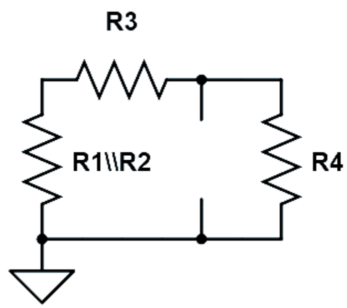
Problema 5. Encontrar el punto de operación del diodo de la figura. (v_{in} = 12 V, R_1= 10 kΩ, R_2 = 5 kΩ, R_3 = 100 kΩ, y R_4 = 50 kΩ)



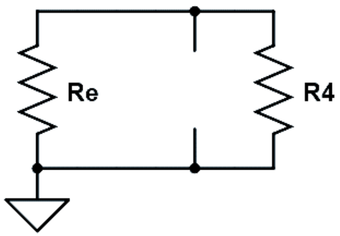




$R1\backslash\backslash \mathrm{R2}$

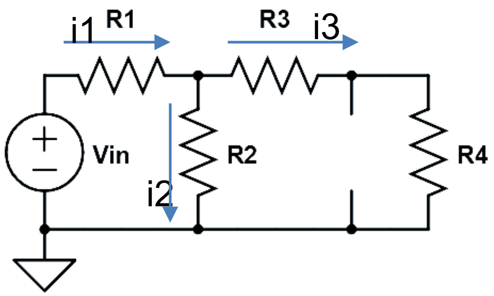


$Re = R3 + (R1\backslash\backslash \mathrm{R2})$



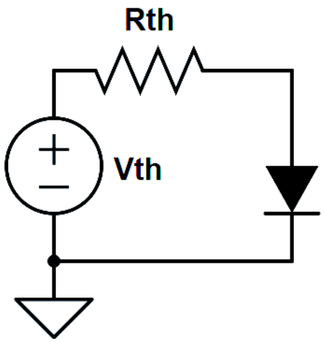
$$Rth = Re \backslash\backslash R4$$

$$Rth = R4 \backslash\backslash\ [R3 + (R1 \backslash\backslash R2)] = 50 \backslash\backslash \left[100 + \frac{10*5}{10+5}\right] = \frac{50*103.33}{50+103.33} = 33.7\ k\Omega$$



$$V_{in} = R_1 i_1 + R_2 i_2 = R_1 i_1 + R_2(i_1 - i_3)$$
$$R_2 i_2 = R_3 i_3 + R_4 i_3 = R_2(i_1 - i_3) = (R_3 + R_4) i_3$$
$$V_{th} = R_4 i_3$$

$$12 = 10 i_1 + 5(i_1 - i_3) = 15 i_1 - 5 i_3$$
$$5(i_1 - i_3) = 150 i_3 \rightarrow i_1 = 155/5 i_3 = 31 i_3$$
$$12 = 15 * 31 i_3 - 5 i_3 \rightarrow i_3 = \frac{12}{460} = 0.0261\ mA$$
$$V_{th} = R_4 i_3 = 50 * 0.0261 = 1.3\ V$$



¿Conducirá el diodo? Vth>0.7V→Suponemos que sí:

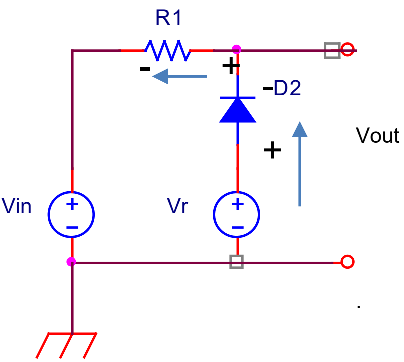
$$V_{th} - V_{Rth} - V_d = 0 = 1.3 - i * 33.69 - V_d = 0$$

$$1.3 - i * 33.69 - 0.7 = 0 \rightarrow i = \frac{1.3 - 0.7}{33.69} = 0.0178\, mA$$

i>0→ Estábamos en lo correcto.

Punto de operación del diodo es Q=(Vd=0.7 V, id= 0.0178 mA).

Problema 6. Hallar la función de transferencia del circuito y dibujar v_{out} vs v_{in} (R_1 = 10 kΩ y V_r = 3V, el voltaje de activación del diodo es 0,7 V).



Una sola malla → no hacemos Thévenin.
Comprobamos los distintos casos en función de Vin.

a) Diodo está en zona de conducción→ la corriente atraviesa R_1 de derecha a izquierda.

$$V_{in} + R_1 i + v_d - V_r = 0$$

Si el diodo está en ON, el voltaje en él es 0,7 V aproximadamente:

$$V_{out} = Vr - Vd = 3 - 0.7 = 2.3\ V$$

Condición para diodo en On → *i*>0

$$i = \frac{V_r - v_d - V_{in}}{R_1} = \frac{3 - 0,7 - V_{in}}{10} = \frac{2,3 - V_{in}}{10}$$

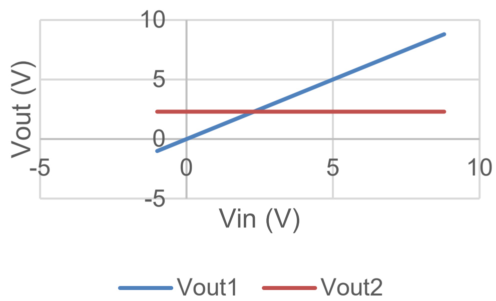
$$i \geq 0 \Rightarrow 2,3 - V_{in} \geq 0 \Rightarrow 2,3 \geq V_{in}$$

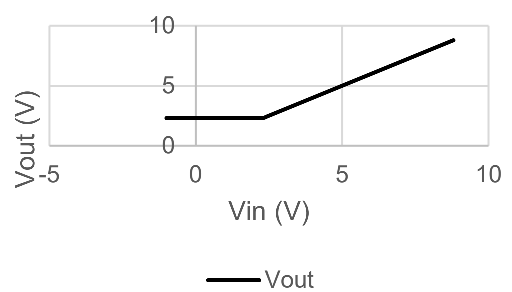
b) Si V_{in} >2,3 el diodo estará en OFF.
Cuando el diodo no conduce no hay corriente por el circuito, no hay caída de tensión en la resistencia y el voltaje en un borne (V_{out}) es igual al voltaje en el otro borne (V_{in}).

En resumen:

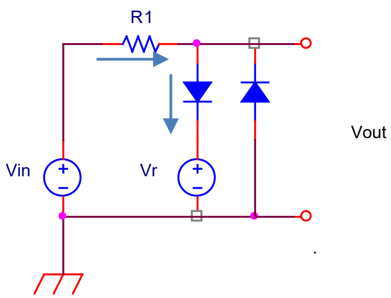
$$V_{out} = V_{in}\ si\ \ V_{in} \geq 2,3V$$

$$V_{out} = 2,3V\ \ si\ \ V_{in} \leq 2,3V$$



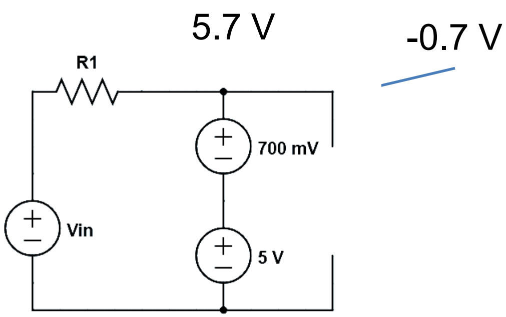


Problema 7 Hallar la función de transferencia del circuito y dibujar v_{out} vs v_{in} (R_1 = 10 kΩ y V_r = 5V, el voltaje de activación de los diodos es 0,7 V).



¿Cuándo están en ON y en OFF?
En este caso, si conduce uno de ellos el otro no puede conducir.
Se darán 3 casos:

a) D1 en ON y D2 en OFF.
b) D2 en ON y D1 en OFF.
c) D1 OFF D2 en OFF

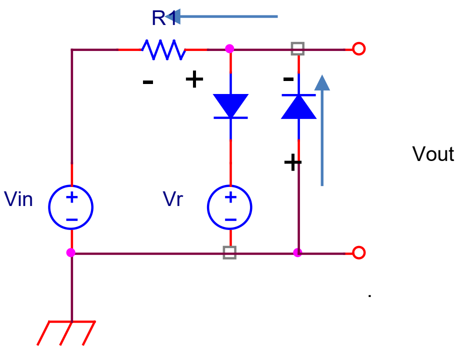


a) Si la corriente i que atraviesa R_1 circula de izda. a dcha.
El diodo que conduce es D1, mientras D2 estará en OFF. Aplicando Kirchhoff en la malla:

$$V_{in} = R_1 i + v_d + V_r$$
$$V_{in} = 10i + 0,7 + 5$$
$$\Rightarrow i = \frac{V_{in} - 5,7}{10}$$

Imponiendo esta condición nos queda que Vin > 5,7 V.
En este caso el voltaje de salida viene dado por:

$$V_{out} = V_d + V_r = 0,7 + 5 = 5,7V$$



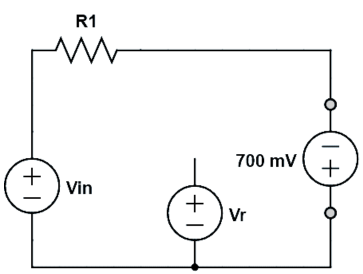
b) Corriente i de dcha a izda, el diodo 1 está en OFF y el diodo 2 está en ON. La ecuación de la malla en este caso nos queda:

$$V_{in} + R_1 i + v_d = 0$$

$$i = \frac{-V_{in} - 0.7}{10}$$

Corriente es positiva → $V_{in} < -0{,}7$ V.
En este caso el voltaje de salida viene dado por:

$$V_{out} = -V_d = -0{,}7V$$



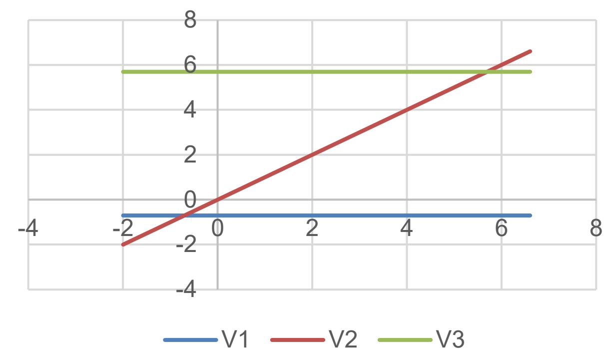
c) Para valores de V_{in} entre -0,7 V y 5,7 V tendremos a los dos diodos en OFF, la corriente que circula por R_1 será nula y por tanto $V_{out} = V_{in}$.

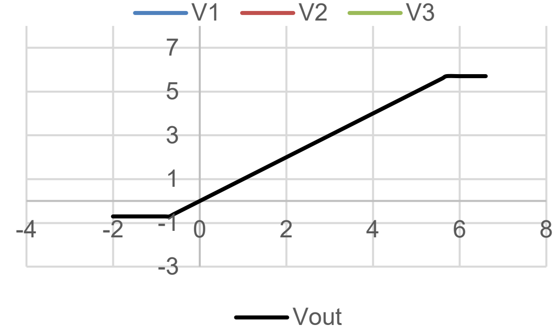
En resumen, el voltaje de salida es:

$$V_{out} = -0{,}7V si \quad V_{in} \leq -0{,}7V$$

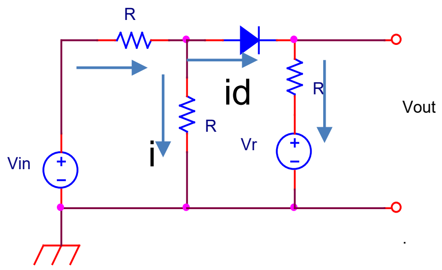
$$V_{out} = V_{in} si \quad -0{,}7V \leq V_{in} \leq 5{,}7V$$

$$V_{out} = 5{,}7V \quad si \quad V_{in} \geq 5{,}7V$$





Problema 8 Hallar la función de transferencia del circuito y dibujar v_{out} vs v_{in}. El voltaje de activación es 0,7 V y la fuente de referencia es 3 V.



Condición que ha de cumplir V_{in} para que el diodo conduzca:
Diodo está en ON → la corriente que genera la fuente circula por R de izda a derecha.
Aplicando las leyes de las mallas tenemos que:

$$V_{in} = R(i + i_d) + Ri$$

$$Ri = v_d + Ri_d + V_r$$

Metiendo los datos del problema tenemos que:

$$V_{in} = 2Ri + Ri_d \Rightarrow V_{in} = 2R\left(\frac{3,7}{R} + i_d\right) + Ri_d = 7,4 + 3Ri_d \Rightarrow i_d = \frac{V_{in} - 7,4}{3R}$$

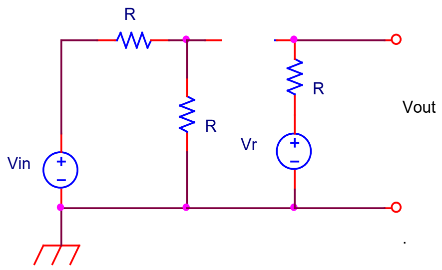
$$Ri = 0,7 + Ri_d + 3 = 3,7 + Ri_d \Rightarrow i = \frac{3,7}{R} + i_d$$

Para que id>0→ V_{in} > 7,4 V. Ambas corrientes quedan positivas.
En este caso V_{out} viene dado por:

$$V_{out} = Ri_d + V_r = R\left(\frac{V_{in} - 7,4}{3R}\right) + 3 = \frac{V_{in}}{3} - \frac{7,4}{3} + 3$$

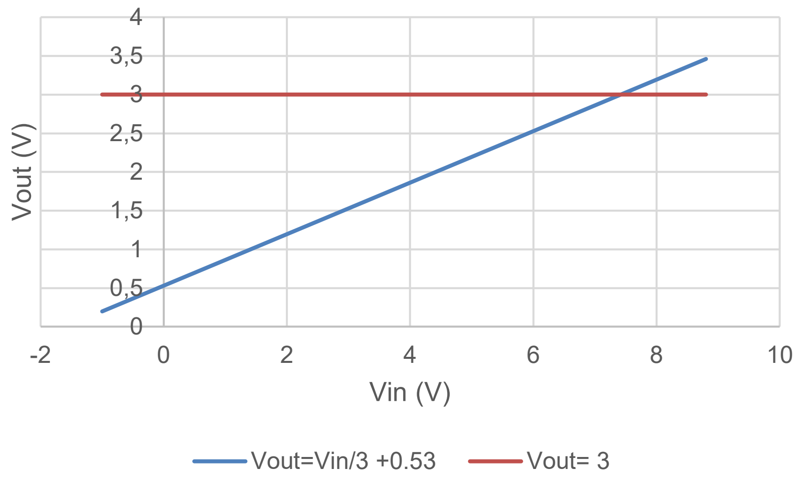
$$V_{out} = \frac{V_{in}}{3} + 0,53$$

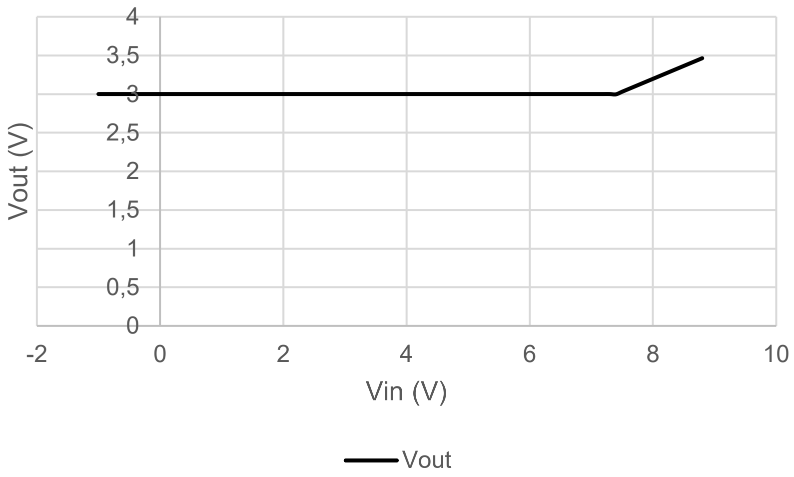
Si V_{in} no supera el valor 7,4 V el diodo estará en OFF y por tanto $V_{out}=Ri_d+V_r=V_r=3$ V.
En resumen tenemos:



$$V_{out} = \frac{V_{in}}{3} + 0{,}53 \quad \boldsymbol{si} \quad V_{in} > 7{,}4V$$

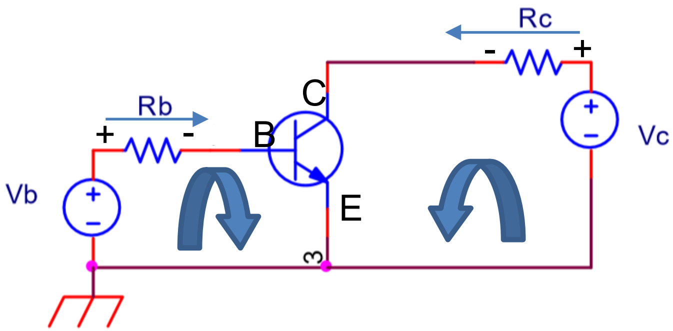
$$V_{out} = 3 \quad \boldsymbol{si} \quad V_{in} < 7{,}4V$$





Tema 3.1. Transistores BJT

Problema 1. Hallar el punto de operación del transistor de la figura (Vf = 0,7V y β = 100). Rb = 100 kΩ, Rc = 1kΩ, Vb = 5V, Vc =10V



$$Vb = V_{RB} + V_{BE} = ib * Rb + V_{BE}$$

$$Vc = V_{RC} + V_{CE} = ic * Rc + V_{CE}$$

Vb>Vf=0.7 V.
Suponemos región activa.

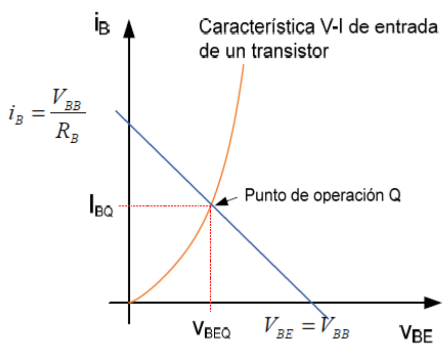
$$Vb = ib * Rb - 0.7 \rightarrow ib = \frac{5 - 0.7}{100} = 0.043\ mA = 43\ \mu A$$

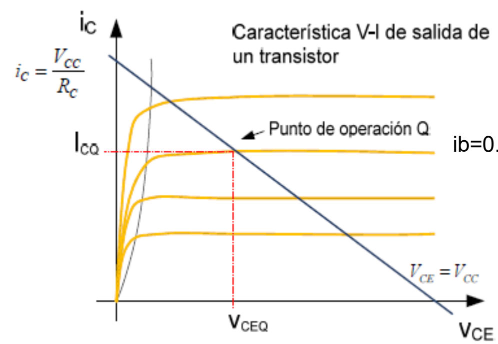
$$ic = ib\beta = 0.043 * 100 = 4.3\ mA$$

$$Vc = ic * Rc + V_{CE} \rightarrow V_{CE} = Vc - ic * Rc = 10 - 4.3 * 1 = 5.7\ V$$

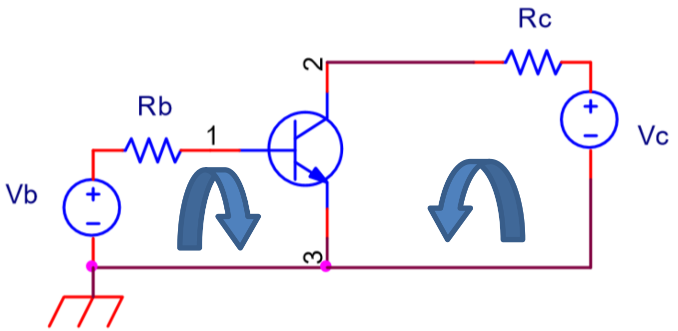
V_{CE}>V_{SAT} (=0-0.2 V)→ El transistor está en la zona de funcionamiento activa.
El punto de funcionamiento es:

$$(V_{BE}, ib) = (0.7\ V, 0.043\ mA)$$
$$(V_{CE}, ic) = (5.7\ V, 4.3\ mA)$$





Problema 2. Hallar el punto de operación del transistor del problema 1 si Vb =15V.



$$Vb = V_{RB} + V_{BE} = ib * Rb + V_{BE}$$
$$Vc = V_{RC} + V_{CE} = ic * Rc + V_{CE}$$

Vb>Vf=0.7 V.
Suponemos región activa.

$$Vb = ib * Rb + 0.7 \rightarrow ib = \frac{15 - 0.7}{100} = 0.143\ mA = 143\ \mu A$$

$$ic = ib\beta = 0.143 * 100 = 14.3\ mA$$

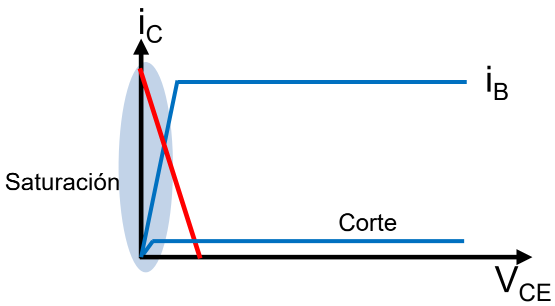
$$Vc = ic * Rc + V_{CE} \rightarrow V_{CE} = Vc - ic * Rc = 10 - 14.3 * 1 = -4.3\ V$$

V_{CE}<V_{SAT} (=0-0.2 V)→ El transistor está en la zona de saturación.
Replanteamos el problema V_{CE}=V_{SAT}=0.2V.

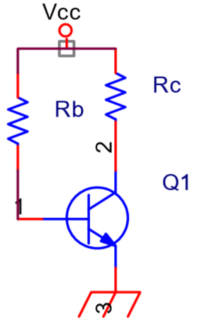
$$Vc = ic * Rc + V_{CE} \rightarrow ic = \frac{Vc - V_{CE}}{Rc} = \frac{10 - 0.2}{1} = 9.8\ mA$$

Punto de Operación

$$(V_{BE}, ib) = (0.7\ V, 0.143\ mA)$$
$$(V_{CE} = V_{sat}, ic_{sat}) = (0.2\ V, 9.8\ mA)$$



Problema 3. Calcular Rb y Rc para que el transistor de la figura opere en el pto. Q definido por ic = 1mA, ib = 10μA y V_{CE} = 7V. Sea V_{CC} =10V y V_{BE} = 0,7V

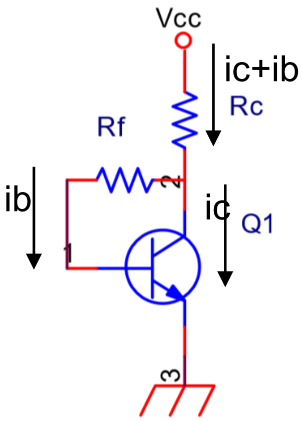


V_{CC}>Vf=0.7 V y V_{CE}>V_{SAT}→ Estará en activa

$$V_{CC} = V_{RB} + V_{BE} = ib * Rb + V_{BE} \rightarrow Rb = \frac{Vcc - V_{BE}}{ib} = \frac{10 - 0.7}{0.01} = \frac{9.3}{0.01} = 930\ k\Omega$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} = ic * Rc + V_{CE} \rightarrow Rc = \frac{Vcc - V_{CE}}{ic} = \frac{10 - 7}{1} = 3\ k\Omega$$

Problema 4. Calcular Rf y Rc para que el transistor de la figura opere en el pto. Q definido por V_{CE} = 5V e ic = 5mA. Datos V_{CC} = 9V y β=99.



V_{CC}>Vf=0.7 V y V_{CE}>V_{SAT}→ Estará en activa

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{Rf} + V_{BE} = (ic + ib) * Rc + ib * Rf + V_{BE}$$

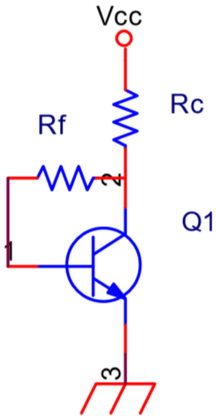
$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{CE} = (ic + ib) * Rc + V_{CE} \xrightarrow{ic=\beta ib} V_{CC} = (ic + ic/99)Rc + V_{CE} \rightarrow Rc = \frac{V_{CC}-V_{CE}}{ic100/99}$$

$$\rightarrow Rc = \frac{9-5}{1.01ic} = \frac{4}{5.05} = 0.792\ k\Omega = 792\ \Omega$$

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{Rf} + V_{BE} = (ic + ib) * Rc + ib * Rf + V_{BE} \xrightarrow{ic=\beta ib} V_{CC} = \left(ic + \frac{ic}{99}\right)Rc + ic/99 * Rf + V_{BE}$$

$$9 = \frac{100}{99}icRc + \frac{icRf}{99} + 0.7 \rightarrow Rf = \frac{9 - 0.7 - 1.01 * 5 * 0.792}{\frac{5}{99}} = \frac{4.30}{0.5050} = 85.15\ k\Omega$$

Problema 5. Calcular el pto. de operación del transistor del problema anterior si β = 99, Vcc = 10V, Rc = 2,7kΩ Rf = 180kΩ.



V_{CC}>Vf=0.7 V y Suponemos que estará en activa

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{Rf} + V_{BE} = (ic + ib) * Rc + ib * Rf + V_{BE} \xrightarrow{ic=\beta ib} 10 = (99ib + ib)Rc + ibRf + V_{BE} \rightarrow$$

$$\rightarrow 10 - 0.7 = (100Rc + Rf)ib \rightarrow ib = \frac{10 - 0.7}{270 + 180} = 0.02067\, mA = 20.67\mu A$$

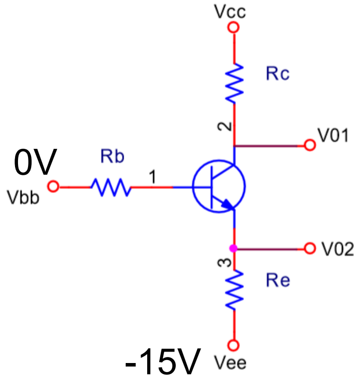
$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{CE} = (ic + ib) * Rc + V_{CE} \xrightarrow{ic=\beta ib} V_{CC} = (99ib + ib)Rc + V_{CE} \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - 100ibRc$$

$$\rightarrow V_{CE} = 10 - 100 * 0.02067 * 2.7 = 4.42\, V$$

V_{CE}>V_{SAT} (=0-0.2 V)→ El transistor está en la zona de funcionamiento activa.
Punto de Operación

$$(V_{BE}, ib) = (0.7\, V, 20.67\mu A)$$
$$(V_{CE}, ic) = (4.42\, V, 2.046\, mA)$$

Problema 6. Calcular V01 y V02 si β = 100, Vbb = 0 V, Vcc = 15 V, Vee = -15 V, Rc = 0,5 kΩ, Re = 1 k Ω Rb = 44 kΩ.



Vee=-15V→Vbb-Vee>0.7 V → Suponemos que está en activa

$$V_{bb} - V_{RB} - V_{BE} - V_{Re} = V_{ee} \rightarrow V_{bb} - \ ib * Rb - V_{BE} - ie * Re - V_{ee} = 0$$

$$ie = ib + ic = ib + \beta ib = (\beta + 1)ib$$

$$0 - \ ib * 44 - 0.7 - ie * 1 - V_{ee} = 0 \xrightarrow{ie=(\beta+1)ib} - \ ib * 44 - 0.7 - (\beta + 1)ib * 1 - (-15) = 0$$

$$ib = \frac{15 - 0.7}{44 + 101} = 0.0986\, mA = 98.6\mu A$$

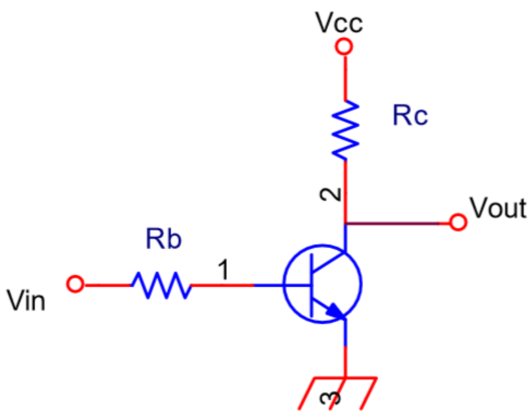
$$ic = 100ib = 9.86\, mA \qquad ie = 101ib = 9.96\, mA$$

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{CE} + V_{Re} + V_{ee} \rightarrow V_{CE} = 15 - ic * 0.5 - ie * 1 - (-15) = 15.14\, V > Vsat \rightarrow Activa$$

$$V_{02} = V_{ee} + V_{Re} = -15 + ie * Re = -15 + 9.96 * 1 = -5.04V$$

$$V_{01} = V_{cc} - V_{Rc} = 15 - ic * Rc = 15 - 9.86 * 0.5 = 10.07V$$

Problema 7. Calcular la característica de transferencia del circuito de la figura. Datos Vcc = 10V, Vf = 0,6 V y β = 100, Rc = 1 kΩ y Rb = 20 kΩ.



Si Vin>Vt→Activa: Vbe=0.6→ $V_{in} - ib * Rb - Vbe = 0 \rightarrow ib = \frac{Vin - Vbe}{Rb} = \frac{Vin}{20} - 0.03$

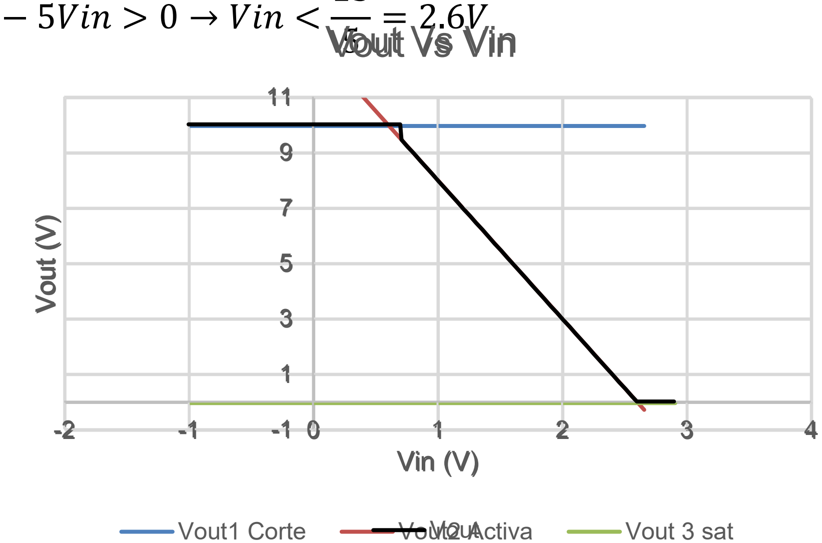
$$Vout = V_{CE} = Vcc - ic * Rc = 10 - 100 * 1\left(\frac{Vin}{20} - 0.03\right) = 10 + 3 - 5Vin$$

$$Vout = V_{CE} = 13 - 5Vin$$

Suponemos Vce=0V→ Región activa si Vce>0

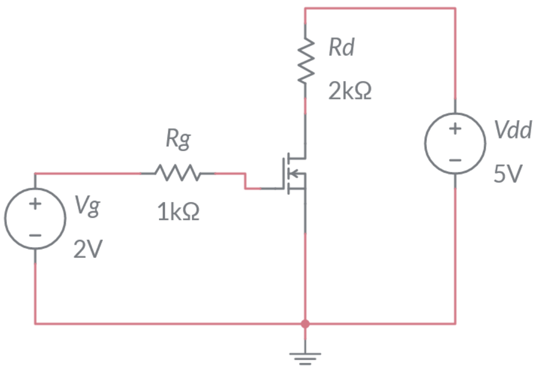
$$V_{CE} = 13 - 5Vin > 0 \rightarrow Vin < \frac{13}{5} = 2.6V$$

$$Si\ 0.6V < Vin < 2.6V \rightarrow Vout = 13 - 5Vin\ (región\ activa)$$
$$Si\ Vin > 2.6V \rightarrow Vout = Vce = 0\ V\ (región\ saturación)$$
$$Si\ Vin < 0.6V \rightarrow Vout = Vcc = 10V\ (región\ de\ corte)$$



Tema 3.2. Transistores FET

Ejemplo 1. Hallar el punto de operación del transistor FET de la figura. Vdd=5 V, VG=2 V, k = 1 mA/V^2, V_{TR} =1 V, Rd = 2 kΩ.



$$V_{GS} = V_G > V_{TR} \rightarrow \begin{cases} Lineal, \text{ si } V_{DS} < V_{GS} - V_{TR} \\ Saturación\ si\ V_{DS} > V_{GS} - V_{TR} \end{cases}$$

Suponemos saturación:

$$id = k(V_{GS} - V_{TR})^2 = 1(2-1)^2 = 1\ mA$$

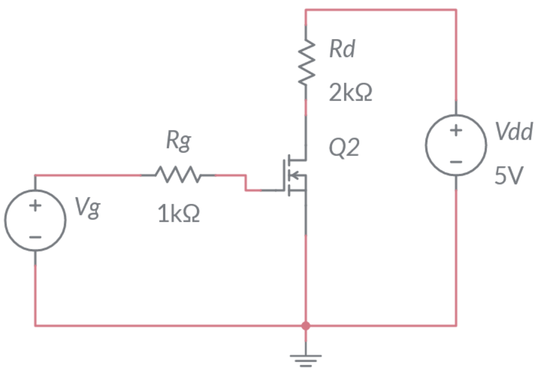
$$V_{dd} = id * Rd + V_{DS} \rightarrow V_{DS} = V_{dd} - id * Rd = 5 - 1 * 2 = 3\ V$$

Comprobamos saturación:

$$V_{sat} = V_{GS} - V_{TR} = 2 - 1 = 1\ V \rightarrow V_{DS} > V_{sat}$$

La suposición era correcta

Ejemplo 2. Hallar el punto de operación del transistor FET de la figura si el voltaje de la fuente Vg aumenta hasta 3 V. Vdd=5 V, k = 1 mA/V², V_{TR} =1 V, Rd = 2 kΩ.



$$V_{GS} = V_G > V_{TR} \rightarrow \begin{cases} Lineal, \text{ si } V_{DS} < V_{GS} - V_{TR} \\ Saturación\ si\ V_{DS} > V_{GS} - V_{TR} \end{cases}$$

Suponemos saturación:

$$id = k(V_{GS} - V_{TR})^2 = 1(3-1)^2 = 4\ mA$$

$$V_{dd} = id * Rd + V_{DS} \rightarrow V_{DS} = V_{dd} - id * Rd = 5 - 4 * 2 = \mathbf{-3\ V}$$

Comprobamos saturación:

$$V_{sat} = V_{GS} - V_{TR} = 3 - 1 = \mathbf{2\ V} \rightarrow V_{DS} < V_{sat}$$

La suposición era incorrecta

Suponemos región lineal. Corriente:

$$id = k[2(V_{GS} - V_{TR})Vds - Vds^2] = 1[2 * 2 * V_{DS} - V_{DS}^2] = -V_{DS}^2 + 4V_{DS}$$

Ecuación de malla:

$$V_{dd} - id * Rd - V_{DS} = 0 \rightarrow 5 - (-V_{DS}^2 + 4V_{DS}) * 2 - V_{DS} = 2V_{DS}^2 - 8V_{DS} - V_{DS} + 5 = 0$$

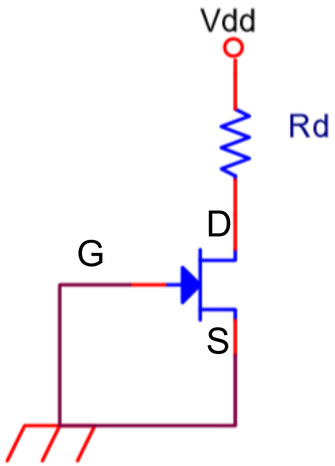
$$V_{DS} = \frac{9 \pm \sqrt{(-9)^2 - 4(2)(5)}}{4} = \frac{9 \pm \sqrt{41}}{4} = \frac{9 \pm 6.4}{4}$$

$$\boldsymbol{V_{DS} = 3.85\ V > V_{sat}}$$

$$V_{DS} = 0.65\ V < V_{sat}$$

$$id = -V_{DS}^2 + 4V_{DS} = 2.18\ mA$$

Problema 7. Hallar para que valor de Vdd tiene lugar la transición de zona de saturación a lineal o triodo. K = 0,5mA/V², V_{TR} =-3V, Rd = 5kΩ.



$$Transición: V_{DS} = V_{sat} = V_{GS} - V_{TR} \begin{cases} V_{DS} < V_{GS} - V_{TR} \rightarrow Lineal \\ V_{DS} > V_{GS} - V_{TR} \rightarrow Saturación \end{cases}$$

$$V_{GS} = 0 \rightarrow Vsat = 0 - V_{TR} = -(-3) = 3V$$

$$V_{dd} = id * Rd + V_{DS} \xRightarrow{Vds=Vsat} V_{dd} = id * Rd + 3$$

Corriente en Saturación

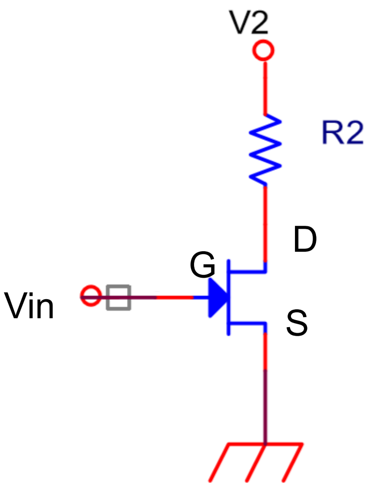
$$id = k(V_{GS} - V_{TR})^2 = 0.5(0+3)^2 = 0.5 * 9 = 4.5\ mA$$

$$V_{dd} = id * Rd + 3 = 4.5 * 5 + 3 = 25.5\ \mathrm{V}$$

Corriente en región lineal

$$id = k[2(V_{GS} - V_{TR})Vds - Vds^2] = 0.5[2 * 3 * 3 - 9] = 4.5\ mA$$

Problema 9. Determinad en el circuito de la figura el Vin necesario para que Vds = 6,2 V. k = 2 mA/V^2, Vtr =-1,5 V, R2 = 4,7 kΩ y V2 = 10 V.



$$Vds = 6.2V \rightarrow V2 - i * R2 - 6.2 = 0 \rightarrow i = \frac{10-6.2}{R2} = \frac{3.8}{4.7} = 0.808\,mA$$

$$V_{GS} = Vin \rightarrow Vsat = Vgs - Vth = Vin + 1.5$$

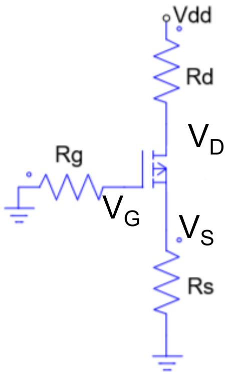
$$Suponemos\ saturación\text{: } id = k(Vgs - Vtr)^2 = 2(Vin + 1.5)^2 = 0.808\,mA \rightarrow$$
$$Vin + 1.5 = \pm\sqrt{0.404} \rightarrow Vin = \pm 0.636 - 1.5$$

$$Vin = 0.636 - 1.5 = -0.864\,V$$ Vin=Vgs>Vtr=-1.5→Activa

$$Vin = -0.636 - 1.5 = -2.136\,V$$ Vin=Vgs<Vtr=-1.5→Corte

$$¿Saturación?: Vds = 6.2\,V > Vsat = Vgs - Vtr = -0.864 + 1.5 = 0.636\,V$$

Problema 10. Hallar Rd y Rs en el circuito de la figura sabiendo que Vdd = 30 V, Vds = 17.5 V, Id = 2.5 mA, Vgs = -1V. (suponer que Ig=0).

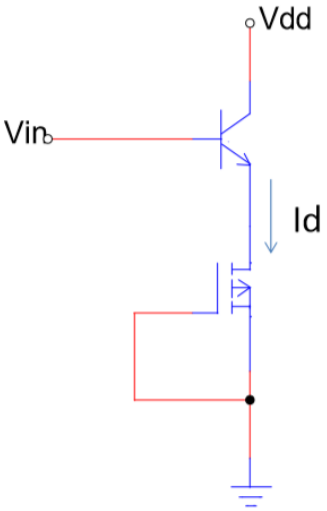


$$V_{dd} = V_{Rd} + V_{DS} + V_{Rs} = id * Rd + V_{DS} + id * Rs$$

$$0 - V_{RG} - V_{GS} - V_{RS} = 0 \rightarrow -V_{GS} = id * Rs \rightarrow Rs = -\frac{V_{GS}}{id} = \frac{1}{2.5} = 0.4\ k\Omega$$

$$V_{dd} - id * Rd - V_{DS} - V_{Rds} = 0 = 30 - 2.5Rd - 17.5 - 1 \rightarrow Rd = \frac{30 - 17.5 - 1}{2.5} = 4.6\ k\Omega$$

Problema 11. Hallar la corriente Id en el circuito de la figura sabiendo que Vdd = 12 V, Vin = 5 V, Vbe= 0.6 V, V_{TR} = - 6 V y K = 0.1 mA/V^2 (suponer que Ig=0).



Suponemos BJT en activa y MOSFET en Saturación

$$Vin - V_{be} - Vds = 0 \rightarrow VDS = 5 - 0.6 = 4.4\,V$$

$$V_{dd} - VCE - VDS = 0 \rightarrow V_{CE} = 12 - 4.4 = 7.6\,V > Vsat\,(BJT) \rightarrow Activa$$

Corriente en Saturación

$$id = k(V_{GS} - V_{TR})^2 = 0.1[0 - (-6)]^2 = 3.6\,mA$$

Comprobamos Saturación MOSFET:

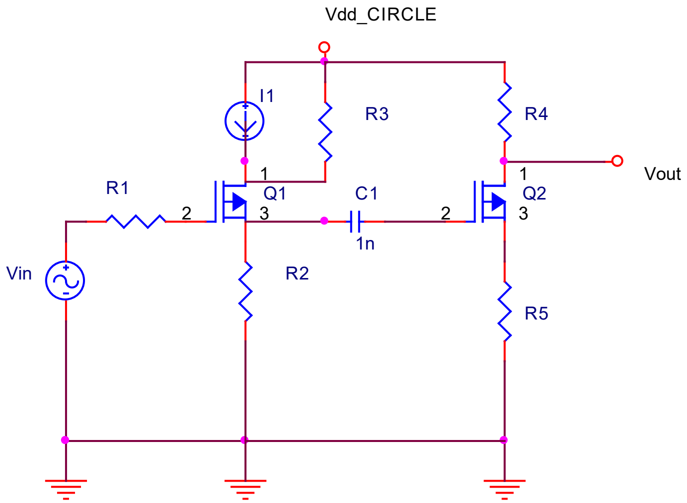
$$V_{DS} = 4.4¿>?\,Vsat = V_{GS} - V_{TR} = 0 + 6 = 6 \;\rightarrow 4.4 < 6$$

Corriente en Lineal/omhica

$$id = k[2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - {V_{DS}}^2] = 0.1[2 * 6 * 4.4 - 4.4^2] = 0.1[52.8 - 19.36] = 3.34\,mA$$

Tema 4. Amplificación con transistores

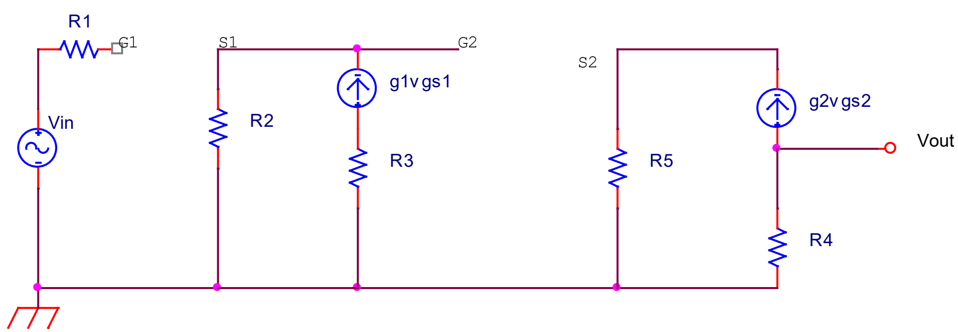
Problema 1. Dibujar el circuito equivalente en pequeña señal (a frecuencias medias) del circuito de la figura. Calcular la ganancia en voltaje v_{out}/v_{in}



Solución: En la figura inferior se ha dibujado el circuito equivalente en pequeña señal y frecuencias medias del circuito original.

Para ello:

- Se anulan las fuentes de continua.
- Se cortocircuitan los condensadores externos
- Se sustituyen los transistores por su modelo equivalente a frecuencias bajas-medias



Problema 1 (Continuación). Calcular la ganancia en voltaje v_{out}/v_{in}

Según se deduce de la figura:

$$v_{out} = -R_4 g_2 v_{gs2}$$

$$v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{g2} - g_2 R_5 v_{gs2}$$

$$\Rightarrow v_{gs2} = \frac{v_{g2}}{1 + g_2 R_5}$$

Por otra parte:

$$v_{g2} = v_{s1} = g_1 R_2 v_{gs1}$$

$$v_{gs1} = v_{g1} - v_{s1} = v_{in} - R_2 g_1 v_{gs1}$$

$$\Rightarrow v_{gs1} = \frac{v_{in}}{1 + R_2 g_1}$$

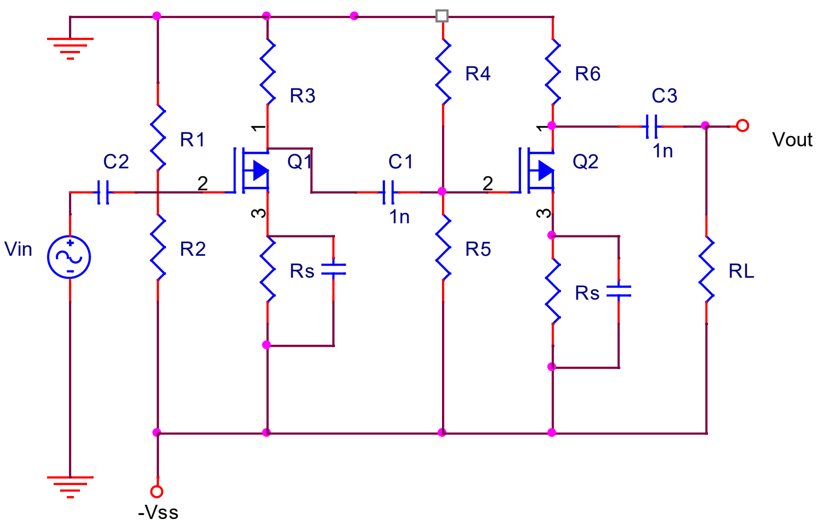
Sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$v_{out} = -R_4 g_2 \frac{v_{g2}}{1 + R_5 g_2} = \frac{-R_4 g_2}{1 + R_5 g_2} g_1 R_2 v_{gs1} = \frac{-R_4 g_2 g_1 R_2}{1 + R_5 g_2} \frac{v_{in}}{1 + R_2 g_1}$$

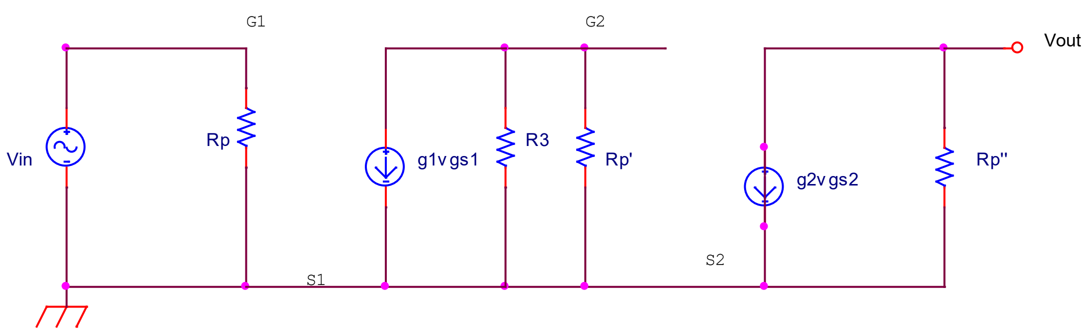
$$\Rightarrow A_v = \frac{-R_4 g_2 g_1 R_2}{(1 + R_5 g_2)(1 + R_2 g_1)}$$

Problema 2. Hallar el equivalente en pequeña señal del circuito de la figura inferior que representa un amplificador de dos etapas.

Hallar la ganancia en voltaje v_{out}/v_{in}.



Solución: El modelo en pequeña señal se muestra en la figura inferior



Problema 2 (Continuación). Hallar la ganancia en voltaje v_{out}/v_{in}.

Donde $R_p=R_1//R_2$, $R_p'=R_4//R_5$, $R_p''=R_6//R_L$. Llamando $R_p^*=R_3//R_p'$ tenemos:

$$v_{out} = -R_p''g_2v_{gs2}$$

$$v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{g2}$$

$$v_{g2} = -R_p^*g_1v_{gs1}$$

$$v_{gs1} = v_{g1} - v_{s1} = v_{in}$$

$$\Rightarrow v_{out} = R_p''g_2R_p^*g_1v_{in}$$

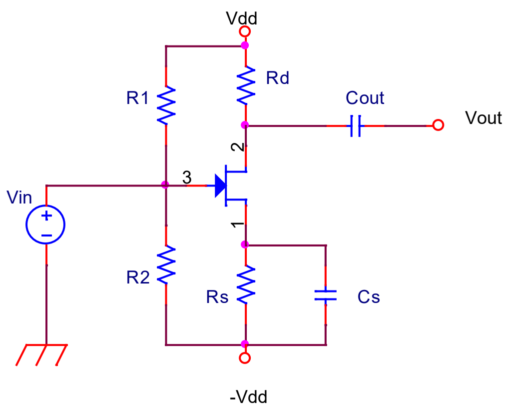
$$\Rightarrow A_v = R_p''g_2R_p^*g_1$$

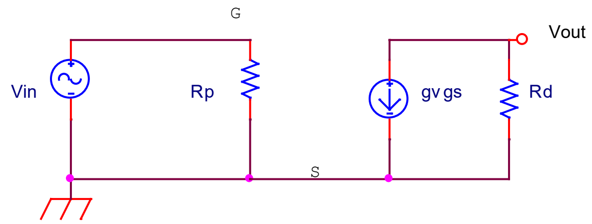
Problema 3. Diseñar un amplificador con un transistor MOSFET (V_T =2V y k =2.10^{-3}A/V^2) con las siguientes características:

A_v = -6
Z_{in} = 2 M
Z_{out} = 1 K

Se dispone de fuentes de alimentación simétricas de ± 6 V y se pretende acoplamiento a la entrada no capacitivo

Solución: Se propone el esquema típico de amplificador en fuente común (dado que la ganancia es negativa) con condensador en la fuente que se muestra en la figura inferior. El circuito equivalente en pequeña señal se muestra a la derecha





Para acoplar directamente la pequeña señal sin condensador se tiene que cumplir que VG =0, lo que implica, al ser la fuente simétrica, que R1 = R2

Donde Rp=R1//R2

Problema 3 (Continuación).

Hallamos la ganancia, la impedancia de entrada y la de salida en pequeña señal. Para hallar Z_{in}, sustituimos la fuente V_{in} por una de prueba y hallamos el cociente entre dicha fuente y la corriente que genera, para hallar Z_{out} cortocircuitamos la fuente V_{in} y colocamos la fuente de prueba a la salida, calculando el cociente entre dicha fuente y la corriente que genera.

$$v_{out} = -g v_{gs} R_d$$

$$v_{in} = v_{gs}$$

$$\Rightarrow A_v = -g R_d$$

$$Z_{in} = R_p$$

$$Z_{out} = R_d$$

Como Z_{in} $=R_p$ $=R_1/2=2M\Omega$, se deriva que R_1 $=4$ $M\Omega$

Como Z_{out} = $1k\Omega$, se deriva que R_d = 1 $k\Omega$

Como A_v =-6, se deriva que g $=6.10^{-3}\ \Omega^{-1}$

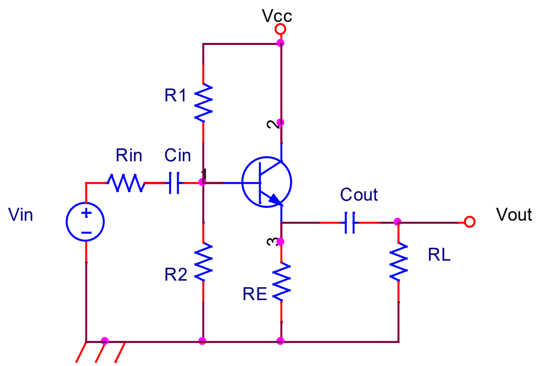
Como $g=2(kI)^{0.5}$, se deriva que I_d =4,5 mA y, suponiendo zona de corriente constante, V_{GS} =3,5 V

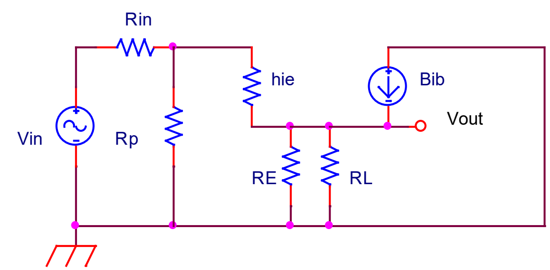
De la malla de entrada en DC y sabiendo que la puerta está a 0V se deriva que $6=V_{GS}+I_DR_S$, pudiéndose despejar el valor de R_S $=0.55k\Omega$

Con la malla de salida se comprueba que $V_{DS}>V_{GS}-V_T$

Problema 4. Hallar la ganancia de tensión (v_{out}/v_b), la ganancia en corriente (i_{out}/i_{in}), impedancia de entrada e impedancia de salida del amplificador de la figura (seguidor de emisor).

Solución. En la figura de la derecha se muestra el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias, donde $R_p=R_1//R_2$. Las flechas indican las corrientes de entrada y de salida. Definimos $R_{LL}=R_E//R_L$





De esa forma es fácil ver que:

$$v_{out} = (\beta+1)i_b R_{LL}$$
$$v_b = i_b h_{ie} + (\beta+1)i_b R_{LL}$$
$$\Rightarrow A_v = \frac{(\beta+1)R_{LL}}{h_{ie}+(\beta+1)R_{LL}}$$

Problema 4 (Continuación).

Por otra parte, para hallar la ganancia en corriente, relacionaremos cada corriente con su voltaje:

$$i_{out} = \frac{v_{out}}{R_L}$$

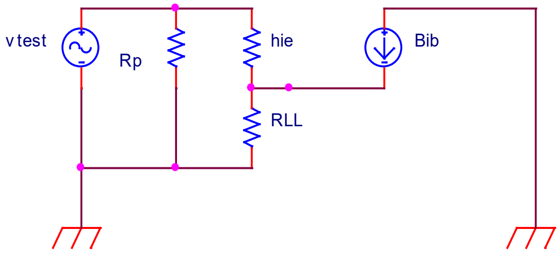
$$i_b = \frac{v_b}{h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}} \Rightarrow \frac{i_{out}}{i_b} = \frac{v_{out}}{v_b}\frac{h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}}{R_L} = \frac{(\beta+1)R_E}{R_E + R_L}$$

Necesitamos relacionar i_b con i_{in} para hallar la ganancia en corriente

$$i_{in} = i_b + \frac{v_b}{R_p} = i_b + \frac{1}{R_p}\left(i_b h_{ie} + (\beta+1)R_{LL} i_b\right) = i_b\left(1 + \frac{1}{R_p}\left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)\right)$$

$$\Rightarrow A_I = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{(\beta+1)R_E R_p}{(R_E + R_L)(R_p + h_{ie} + (\beta+1)R_{LL})}$$

Para hallar la impedancia de entrada, sustituimos la excitación (fuente v_{in} y resistencia R_{in}) por una fuente de prueba (v_{test}) y calculamos la relación entre dicha fuente y la corriente que genera (i_{test}), ver figura inferior.



De la figura se infiere que:

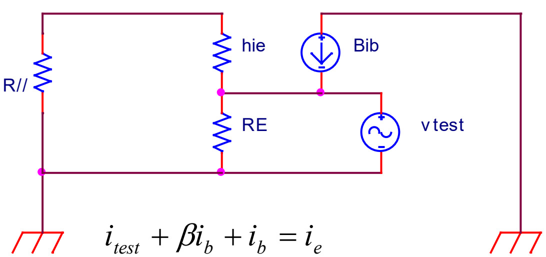
Problema 4 (Continuación).

$$v_{test} = v_b = i_b\left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)$$

$$i_{test} = i_b + \frac{v_b}{R_p} = i_b + \frac{i_b}{R_p}\left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{v_{test}}{i_{test}} = \frac{\left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)}{1 + \frac{1}{R_p}\left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)} = \frac{R_p\left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)}{R_p + \left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right)} = R_p // \left(h_{ie} + (\beta+1)R_{LL}\right) = Z_{in}$$

Para calcular la impedancia de salida se cortocircuita la fuente independiente y se coloca a la salida la fuente de prueba (en lugar de la resistencia de carga), ver figura inferior.



$$i_{test} + \beta i_b + i_b = i_e$$

Donde $R_{//} = R_{in} // R_p$
Llamando i_b a la corriente que pasa por h_{ie} y i_E a la corriente que pasa por R_E, en el nudo donde confluyen las corrientes queda:

Aplicando la ley de Ohm en R_E y en $h_{ie} + R_{//}$ queda:

$$i_b = \frac{-v_{test}}{R_{//} + h_{ie}}$$

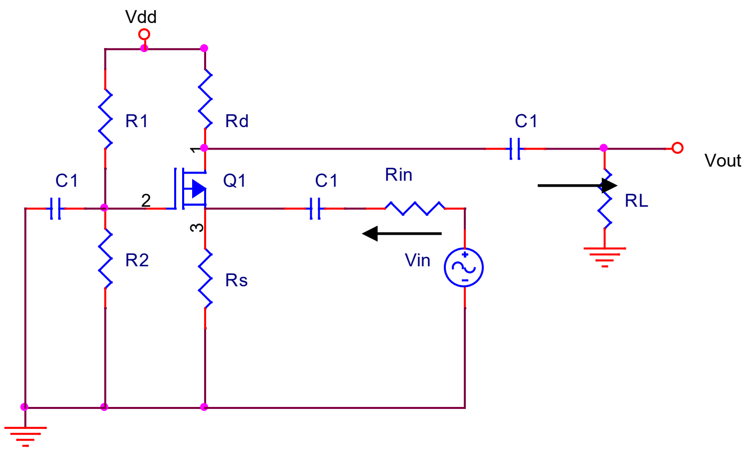
$$i_e = \frac{v_{test}}{R_E}$$

Sustituyendo en la ecuación de las corrientes:

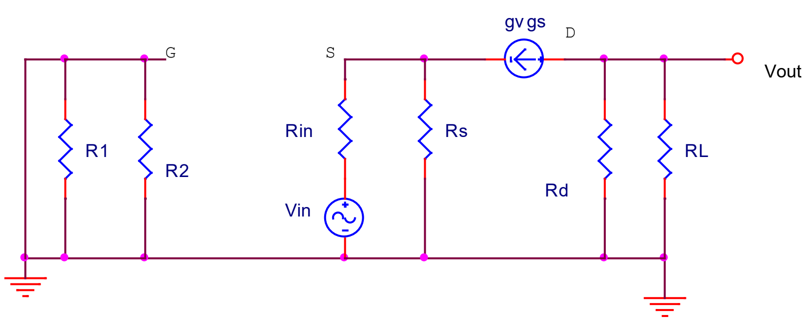
$$i_{test} + (\beta+1)\frac{-v_{test}}{R_{//} + h_{ie}} = \frac{v_{test}}{R_E}$$

$$\frac{v_{test}}{i_{test}} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{\beta+1}{\left(h_{ie} + R_{//}\right)}} = Z_{out}$$

Problema 5. El circuito de la figura es un amplificador en puerta común. Dibujad el equivalente en pequeña señal y calcular las ganancias en tensión v_{out}/v_s y en corriente i_o/i_i



Solución. En la figura inferior se ha dibujado el circuito equivalente en pequeña señal (frecuencias medias)



Problema 5 (Continuación).

Las resistencias R_1 y R_2 están cortocircuitadas por el condensador C_1. Llamaremos R_{LL} =$R_d//R_L$
De la figura se deduce que:

$$v_{out} = -g v_{gs} R_{LL}$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = -v_s$$

$$\Rightarrow v_{out} = g v_s R_{LL}$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_{out}}{v_s} = g R_{LL}$$

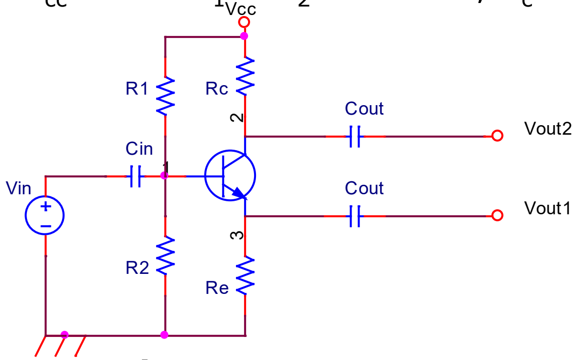
Para hallar la ganancia en corriente relacionamos cada corriente con su voltaje:

$$i_{out} = \frac{v_{out}}{R_L}$$

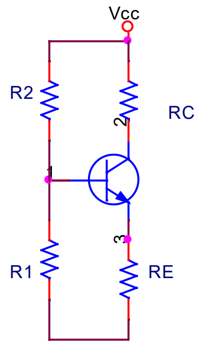
$$i_{in} = i_s - g v_{gs} = \frac{v_s}{R_s} + g v_s = v_s (g + \frac{1}{R_s})$$

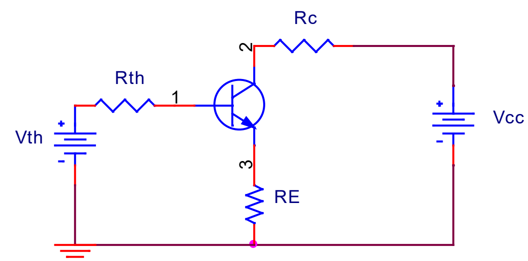
$$\Rightarrow A_I = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{v_0 / R_L}{v_s \left(g + \frac{1}{R_s} \right)} = \frac{v_0}{v_s} \frac{1}{R_L \left(g + \frac{1}{R_s} \right)} = \frac{g R_{LL}}{R_L \left(g + \frac{1}{R_s} \right)}$$

Problema 6. El transistor de la figura esta polarizado en la zona activa. Suponiendo que β es muy grande hallar la corriente de polarización I_c.
Hallar las ganancias de pequeña señal para las dos salidas. Si la Terminal v_{out1} se conecta a tierra, hallar la nueva ganancia en voltaje.
V_{cc} =15 V R_1 = R_2 = 100 kΩ, R_c = 4.3 kΩ, R_E = 6.8 kΩ,



Solución. Para hallar el punto de operación realizamos el estudio en continua (condensadores externos en circuito abierto). Entre base y emisor realizamos un equivalente de Thévenin para simplificar la malla de entrada resultando el circuito de la figura de la derecha





$$V_{th} = V_{cc}\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 7{,}5V$$

$$R_{th} = R_1 // R_2 = 50k$$

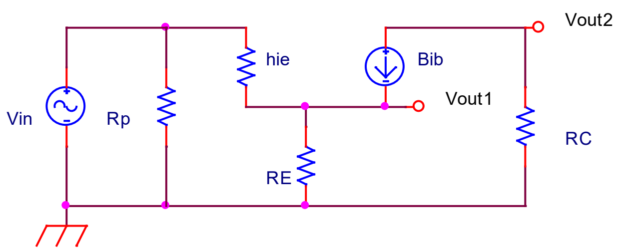
Problema 6 (Continuación).

De la malla de entrada obtenemos i_b

$$i_b = \frac{V_{th} - 0.7}{R_{th} + R_E(\beta + 1)} \approx \frac{6{,}8}{6{,}8\beta} = \frac{1}{\beta}$$

$$i_c = 1mA$$

Con i_b obtenemos una expresión para $h_{ie} = 0.026\ \beta$
Una vez obtenido el punto de trabajo, realizamos el estudio en pequeña señal. En la figura inferior se muestra el circuito equivalente a frecuencias medias.



De la figura se infiere que:

$$v_{out2} = -\beta i_b R_c$$

$$v_{out1} = R_E(\beta + 1)i_b$$

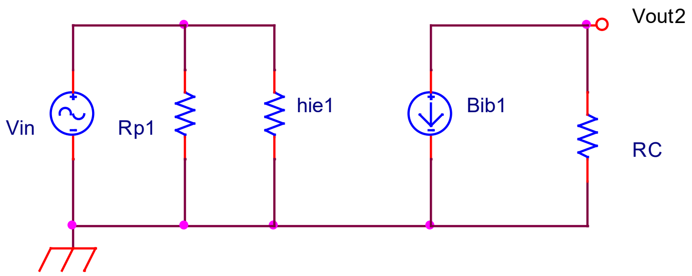
$$v_{in} = i_b h_{ie} + i_b(\beta + 1)R_E$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out1}}{v_{in}} = \frac{R_E(\beta + 1)}{h_{ie} + (\beta + 1)R_E} \approx 1$$

$$\Rightarrow \frac{v_{out2}}{v_{in}} = \frac{-\beta R_c}{h_{ie} + (\beta + 1)R_E} \approx -\frac{R_c}{R_E} = 0.63$$

Problema 6 (Continuación).

En la última parte del problema nos piden hallar la ganancia v_{out2}/v_{in} cuando el terminal v_{out1} se conecta a tierra.
Si se conecta a tierra dicho terminal la resistencia $R_{E,}$ queda cortocircuitada quedando el circuito de la figura inferior



$$v_{out2} = -R_c \beta i_b$$

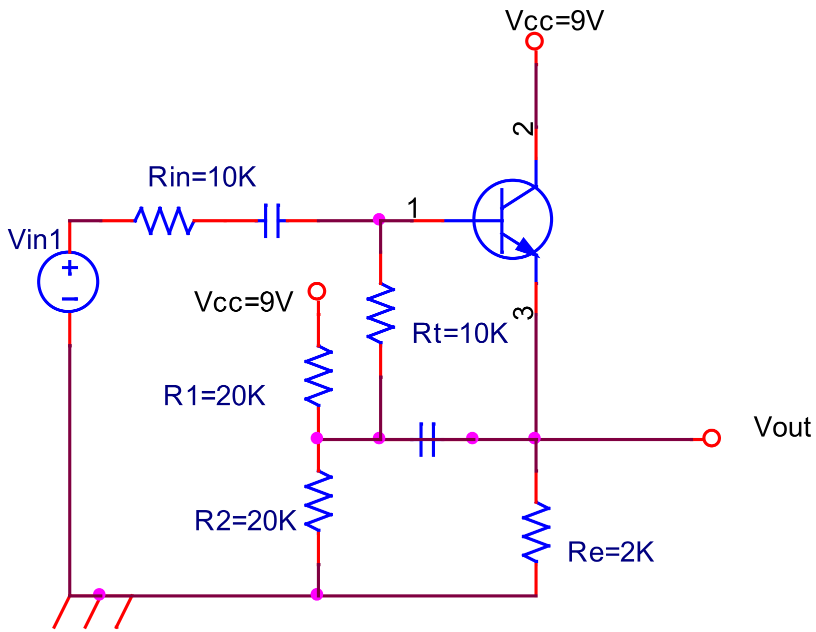
$$v_{in} = h_{ie} i_b$$

$$\Rightarrow A = \frac{v_{out2}}{v_{in}} = \frac{-R_c\beta}{h_{ie}} = \frac{-R_c\beta}{0.026\beta} = \frac{-R_c}{0.026} = -165$$

Problema 7. El circuito de la figura es un seguidor de inicialización. Obtener el punto de trabajo y los parámetros de pequeña señal.

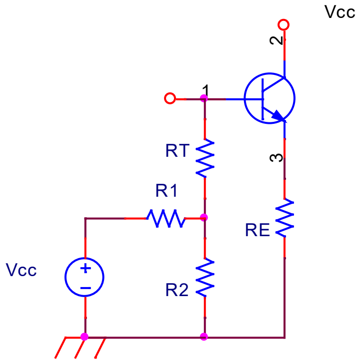
Obtener la ganancia en tensión v_0/v_i.

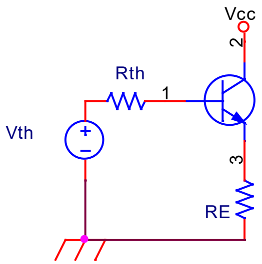
Obtener la resistencia de entrada.



Problema 7 (Continuación).

Solución. Para obtener los parámetros de pequeña señal (r_π y g_m) tenemos que hallar el punto de trabajo. En la figura inferior (izda) podemos ver el circuito en continua. Para resolverlo, conviene hacer un equivalente de Thévenin entre base y tierra (figura dcha.).





$$V_{th} = V_{BB}\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 9.\frac{20}{40} = 4{,}5V$$

$$R_{th} = R_T + R_1 // R_2 = 20k\Omega$$

Problema 7 (Continuación). A continuación, hallamos el punto de trabajo:

$$V_{th} = R_{th} I_b + 0.7 + R_E(\beta+1) I_b$$

$$\Rightarrow I_b = \frac{4{,}5-0{,}7}{20+2(101)} = \frac{3{,}8}{222} = 17\mu A$$

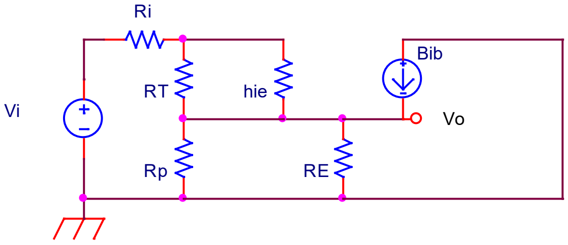
$$\Rightarrow I_c = 1{,}7mA$$

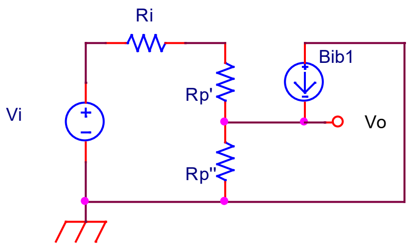
Una vez obtenido el punto de trabajo, hallamos los parámetros de pequeña señal:

$$r_\pi = \frac{0{,}026}{0{,}017} = 1{,}5k\Omega$$

$$g_m = \frac{100}{1{,}5} = 66{,}7mA/V$$

A continuación, hacemos el análisis en alterna (AC). Para ello dibujamos el circuito equivalente en pequeña señal a frecuencias medias.





$$R_p' = R_T // r_\pi = 10//1{,}5 = 1{,}3k\Omega$$

$$R_p'' = R_E // r_p = 10//2 = 1{,}7k\Omega$$

$$i_b = \frac{R_T}{R_T + r_\pi} i_{in} = 0{,}87 i_{in}$$

Donde R_p es el paralelo entre R_1 y R_2 (10 kΩ).
Haciendo el paralelo entre R_T y r_π (al que llamaremos R_p') y entre R_p y R_E (al que llamaremos R_p'') tenemos el divisor de corriente que relaciona a i_b con i_{in}.

Problema 7 (Continuación).

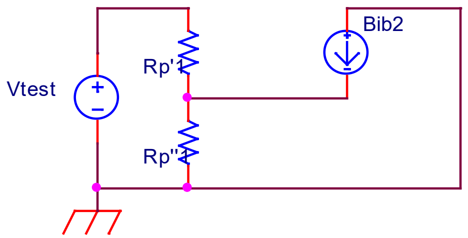
De la figura se deduce que:

$$v_{in} = (R_i + R_p')i_{in} + R_p''(i_{in} + \beta i_b) = (R_{in} + R_p' + R_p'')i_{in} + \beta R_p'' \frac{R_T}{R_T + r_\pi} i_{in}$$

$$v_o = R_p''(i_{in} + \beta i_b) = R_p'' i_{in} + \beta R_p'' \frac{R_T}{R_T + r_\pi} i_{in}$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_p'' + \beta R_p'' \dfrac{R_T}{R_T + r_\pi}}{R_i + R_p' + R_p'' + \beta R_p'' \dfrac{R_T}{R_T + r_\pi}} = 0.93$$

Para hallar la resistencia de entrada utilizamos el método de la fuente de prueba a la entrada (ver figura inferior)



De la figura se deduce que:

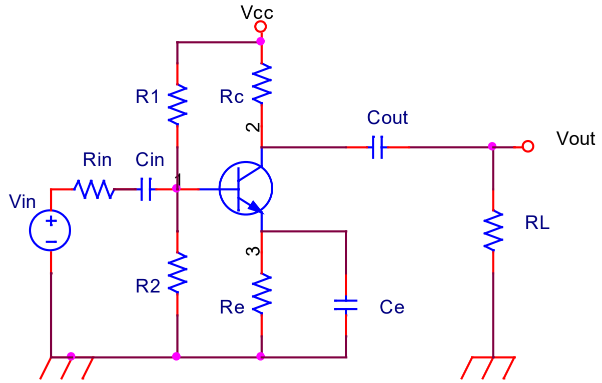
$$i_b = 0{,}87 i_{test}$$

$$v_{test} = i_{test} R_p' + (i_{test} + \beta i_b) R_p'' = i_{test}\left(R_p' + R_p'' + \beta R_p'' \frac{R_T}{R_T + r_\pi} \right)$$

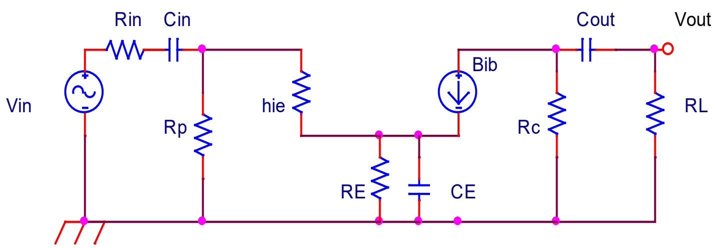
$$\Rightarrow R_{in} = R_p' + R_p''(1 + \beta 0{,}87) = 150{,}9 k\Omega$$

Tema 5. Respuesta en frecuencia

Problema 1. En el circuito de la figura hallar la frecuencia baja de corte (ω_L) aplicando el método de las constantes de tiempo.
Datos: g_m = 4.72 mA/V, h_{ie} = 21,1 kΩ, β= 99.6, R_C = 39 KΩ, R_{B1} = 47 KΩ, R_{B2} = 68 KΩ, R_i = 60 KΩ, R_L = 50 KΩ, R_E = 39 KΩ, C = 2 μF.

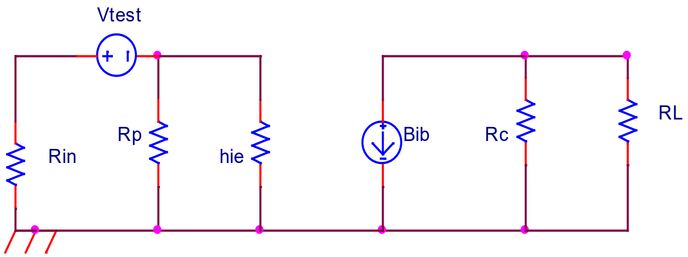


Solución. En este caso, dado que el enunciado nos proporciona los parámetros de pequeña señal, no es necesario calcular el punto de trabajo. En la figura inferior se muestra el circuito equivalente de pequeña señal.

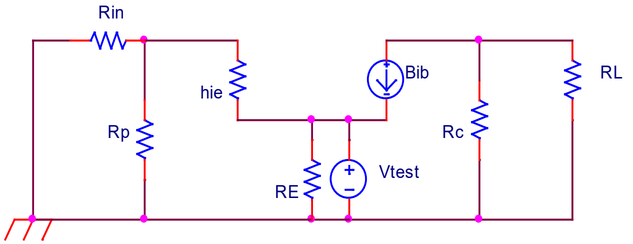


Problema 1. (Continuación)

Calculamos la resistencia vista por cada uno de los condensadores externos con el fin de aplicar el método de las constantes de tiempo. Resistencia vista con C_{in}. Anulamos las fuentes independientes, cortocircuitamos C_E y C_{out} y sustituimos C_{in} por la fuente de prueba.



Es fácil de obtener que la relación entre V_{test} e I_{test} es:
$R_{in} = R_p // h_{ie} + R_{in}$
•Resistencia vista por C_{out}. Haciendo lo mismo y teniendo en cuenta que al anular la fuente independiente también se anula la dependiente, la resistencia vista por este condensador es $R_c + R_L$.
•Resistencia vista por C_E. El circuito que hay que resolver es el que se muestra en la figura inferior.



$$i_{test} + \beta i_b + i_b = i_e$$

$$i_e = \frac{v_{test}}{i_b}$$

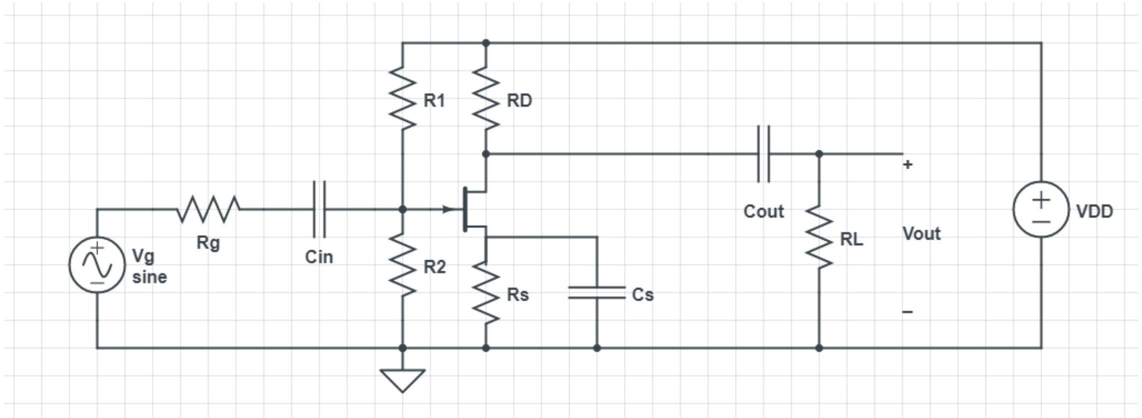
Llamaremos R_{eq} a $h_{ie} + (R_{in} // R_p)$ tenemos que $i_b = v_{test}/R_{eq}$ y sustituyendo en la ecuación anterior:

$$i_{test} + (\beta + 1)\frac{-v_{test}}{R_{eq}} = \frac{v_{test}}{R_E}$$

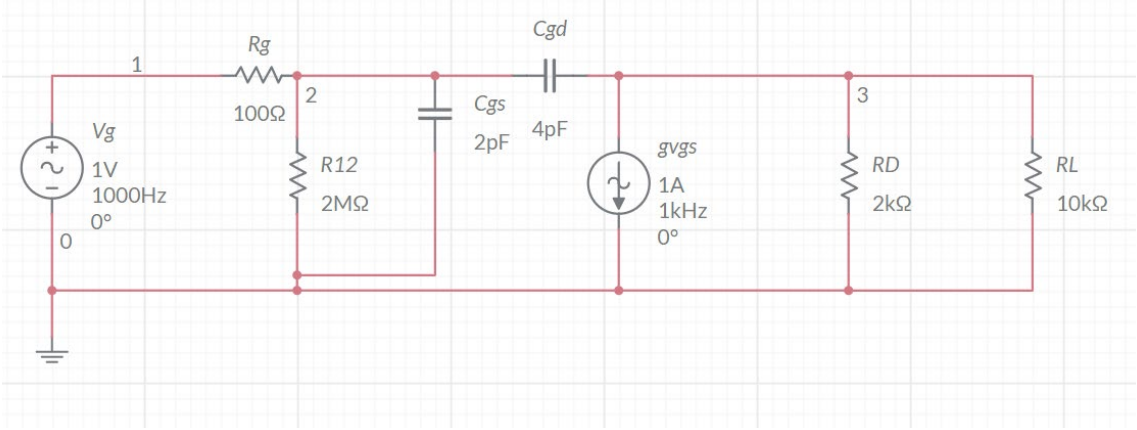
$$\Rightarrow \frac{v_{test}}{i_{test}} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{R_{eq}}}$$

Problema 2. Tenemos un amplificador en configuración de fuente común, como el de la figura. El punto de trabajo del transistor nos da una constante g_m=1.4 mA/V. Calcula la frecuencia alta de corte de dicho amplificador.

Datos: R_1 = 2,7 MΩ R_2=7,6 MΩ, R_g =100 Ω, R_D = 2 kΩ, R_L = 10 kΩ, C_{in}=C_{out}=C_S=1 μF C_{GS}=2 pF y C_{GD}=4 pF.



Solución. Primero dibujamos el circuito equivalente en pequeña señal y alta frecuencia del amplificador. Para ello, sustituimos el transistor FET por su circuito equivalente de pequeña señal y alta frecuencia (incluyendo los condensadores internos), la fuente de DC se pone a cero (se conecta a tierra) y los condensadores externos se sustituye por cortocircuitos, debido a su alto valor (Z=0).



Problema 2. (Continuación)

Calculamos la R_{Cgs} mediante el método de la fuente de prueba. Para ello, sustituimos C_{gs} por v_{test}, dejando el otro condensador en abierto (figura izda) y calculamos v_{test}/i_{test}. Es fácil comprobar que :

$$R_{Cgs} = R_g // R_{12} \qquad (2)$$

Lo que nos da un valor de R_{Cgs} = 100 W

De forma análoga, calculamos R_{Cgd}, sustituyendo C_{gd} por la fuente de prueba y dejando el otro condensador en abierto (figura dcha). Llamando R_g' al paralelo entre R_g y R_{12}, y R_L' al paralelo entre R_D y R_L tenemos que:

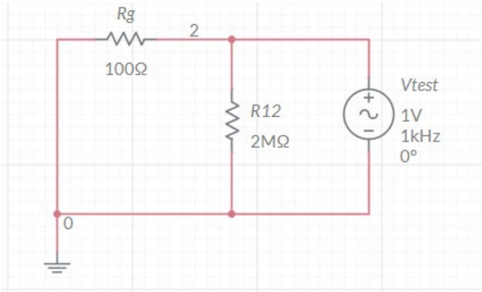
$$v_{test} = R_g' i_{test} + R_L'(i_{test} + g v_{gs}) \qquad (3)$$

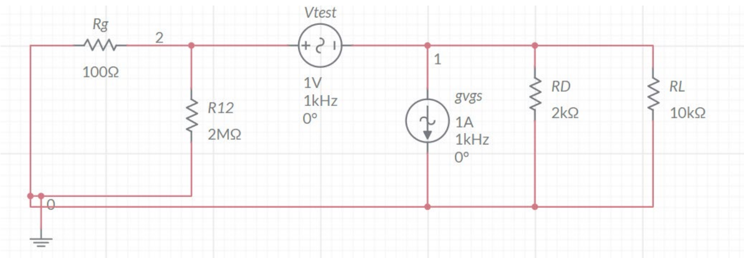
sabiendo que $v_{gs} = R_g' i_{test}$ sustituimos en la ecuación anterior y despejamos,

$$\frac{v_{test}}{i_{test}} = R_g' + R_L'\left(1 + gR_g\right) = R_{Cgd} \qquad (4)$$

Obtenemos un valor de R_{Cgd}= 2,04 kW

Metiendo estos datos numéricos conseguidos, en la expresión (1), obtenemos un valor para la frecuencia alta de corte, f_H, de 18,9 MHz





Universidad Rey Juan Carlos

Para cualquier duda o sugerencia de mejora, puedes escribir a belen.arredondo@urjc.es y beatriz.romero@urjc.es

Agradecimientos a los profesores Gonzalo del Pozo y Felipe Machado por su contribución a este documento