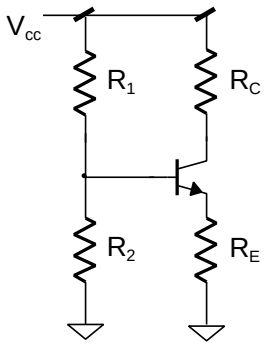
E3.1
Se desea polarizar el circuito de la figura con:
$I_C = 3mA$, $V_{CE} = 3v$.



1. Computar la potencia (media) consumida por el montaje completo: P_T así como la consumida por el transistor: P_{BJT}
2. Computar los valores de resistencias requeridos para obtener los valores de polarización anteriores
3. Determinar las variaciones de la polarización (I_C, V_{CE}) así como de la potencia total consumida, para una $\beta_f \in [40, 300]$

(Datos) $V_{cc} = 12v$, $I_s = 2nA$, $\beta_f = 220$, $V_{AF} = 120v$

Solución

1. Como el transistor se encuentra en activa:

$$P_{BJT} \simeq V_{CE}\, I_C = 3v\, 3mA = 9mW$$

La potencia total del montaje es igual a la cedida por la fuente, supongamos que $I_{R1} << I_C$:

$$P_T = V_{CC}\ (I_C + I_{R1}) \simeq V_{CC}\, I_C$$

2. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento estático del circuito, suponiendo que el transistor se encuentra en la zona de activa directa son:

$$\begin{aligned} V_{CC} &= R_C\, I_C + V_{CE} + R_E\, I_E \\ V_{CC} &= R_1\, I_{R1} + V_{BE} + R_E\, I_E \\ R_2\ (I_{R1} - I_B) &= V_{BE} + R_E\, I_E \\ I_E &= I_C + I_B \\ I_C &= I_s\, \exp \frac{V_{BE}}{V_t} \\ I_C &= \beta_f\, I_B \end{aligned}$$

Al conocer el nivel de corriente podemos obtener:
$V_{BE} = V_t\, ln\left(\frac{I_C}{I_s}\right) = 0{,}37v$.
Completemos el sistema con suposiciones:

$$\begin{aligned} R_E\, I_E &= 2v \\ I_{R1} &= 11\, I_B \end{aligned}$$

Asumiendo que $I_B << I_C$ podemos suponer $I_E \simeq I_C$, obteniendo:

$$\begin{aligned} R_C &= \frac{V_{CC} - V_{CE} - R_E\, I_E}{I_C} = \frac{12 - 3 - 2}{3m} = 2{,}33k\Omega \\ R_E &= \frac{2}{3m} = 0{,}66k\Omega \\ I_B &= \frac{I_C}{\beta_f} = 13{,}63\mu A \\ I_{R1} &= 150\mu A \\ R_1 &= \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E\, I_E}{I_{R1}} = \frac{12 - 0{,}37 - 2}{150\mu} = 64{,}2k\Omega \\ R_2 &= \frac{V_{BE} + R_E\, I_E}{I_{R1} - I_B} = \frac{2{,}37}{136{,}3\mu} = 17{,}38k\Omega \end{aligned}$$

3. Resulta más cómodo reconvertir la porción izquierda del circuito (R_1 y R_2) en su equivalente Thevenin:

$$\begin{aligned} V_{th} &= R_{th}\, I_B + V_{BE} + R_E\, I_C \\ V_{th} &= V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2{,}56v \\ R_{th} &= R_1 || R_2 = 13{,}66k\Omega \end{aligned}$$

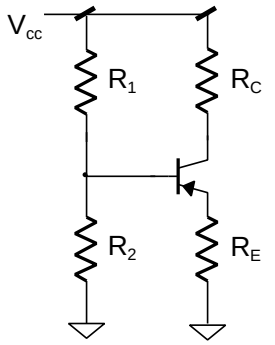
Tomemos $\beta_f = 300$, supongamos que el nivel de corriente será similar y podemos tomar $V_{BE} \simeq 0{,}37v$.

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta_f}} = \frac{2{,}57 - 0{,}37}{0{,}66k + \frac{13{,}66k}{300}} = 3{,}12mA \\ P_T &\simeq V_{CC}\, I_{CC} = 37mW \\ V_{CE} &= V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = 12 - 0{,}66k\ 3{,}12m = 2{,}67v \end{aligned}$$

Repitiendo para $\beta_f = 40$:

$$\begin{aligned} I_C &= 2{,}19mA \\ P_T &= 26mW \\ V_{CE} &= 5{,}62v \end{aligned}$$

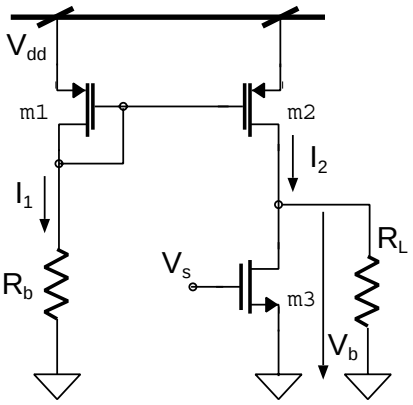
E3.2
Para el circuito de la figura



1. Determinar el valor de las resistencias, para obtener una polarización: $I_C = 3mA$, $V_{EC} = 1v$.
2. Realizar las modificaciones necesarias para que las variaciones de I_C no superen el 10 %, sabiendo que: $\beta_f \in [30, 200]$.

(Datos) $V_{cc} = -5v$ $I_s = 2nA$**,** $\beta_f = 180$**,** $V_{AF} = 90v$

E3.3
Para el circuito de la figura



1. Dimensionar R_b para obtener $I_2 = 500\mu A$.
2. Determinar el valor de R_L para que todos los transistores funcionen en saturación

(Datos) $W_1/L_1 = 1$, $W_2/L_2 = 10$, $W_3/L_3 = 5$ $V_s = 2v$ $V_{dd} = 5v$ $\gamma = 0{,}8v^{0,5}$, $\Phi_f = 0{,}6v$

	nMOS	pMOS	unid.
K_N	40μ	20μ	A/v^2
V_{th}	0,7	$-0{,}7$	v
λ	0,01	0,01	v^{-1}

Solución

1. Como m1 y m2 forman un espejo de corriente verifican:

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_2} &= \frac{W_1/L_1}{W_2/L_2} \\ \mathrm{V_{SG2}} &> \mathrm{V_{th0}} \\ \mathrm{V_{SD2}} &> \mathrm{V_{SG2} - V_{th0}} \end{aligned}$$

Por lo que: $I_1 = 50\mu A$, y por tanto:

$$\mathrm{V_{SG2}} = |\mathrm{V_{th0}}| + \sqrt{\frac{2\,\mathrm{I_1}}{K_p\, W_1/L_1}} = 2{,}936v$$

La resistencia solicitada por tanto:

$$\mathrm{R_b} = \frac{\mathrm{V_{dd} - V_{SG2}}}{\mathrm{I_L}} = 41{,}28k\Omega$$

2. Suponiendo que todos los transistores se encuentran en saturación:

$$\begin{aligned} \mathrm{I_{d3}} &= \frac{1}{2} K_n\, (W_3/L_3)\, (V_s - V_{th0})^2 = 169\mu A \\ \mathrm{V_o} &= (\mathrm{I_{d2} - I_{d3}})\, \mathrm{R_L} \end{aligned}$$

Debiendo de cumplirse que:

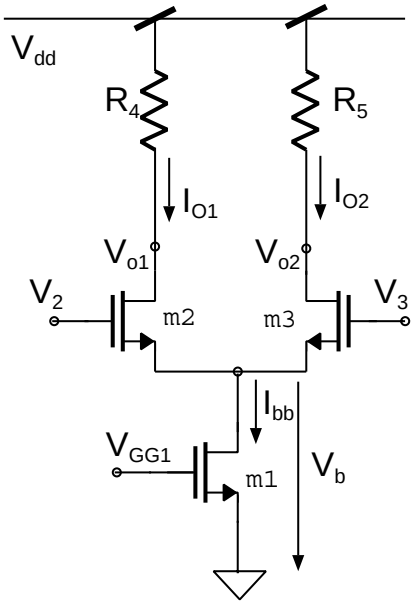
$$\begin{aligned} \mathrm{V_{dd} - V_o = V_{SD2}} &> \mathrm{V_{SG2} - |V_{th0}|} \\ \mathrm{V_o = V_{DS3} > V_{GS3} - V_{th0}} & \end{aligned}$$

Lo cual se cumple cuando: $3{,}93K\Omega < \mathrm{R_L} < 8{,}13K\Omega$

E3.4-Par diferencial
Para el circuito de la figura

1. Determinar las simplificaciones que se pueden obtener al suponer:
   $R_4 = R_5$, $W_2/L_2 = W_3/L_3$, $V_2 = V_3$
2. Dimensionar el transistor m1 (W_1/L_1 y V_{GG1}) para $I_{bb} = 100\mu A$ con $V_b >= 0{,}4v$
3. Basándose en los resultados de los apartados anteriores, determinar: I_{o1}, I_{o2}, V_{o1}, V_{o2}.
4. Determinar el rango de valores posibles de la tensiones V_2 (supuesta igual a V_3) para mantener a todos los transistores en saturación.
5. Suponiendo que $V_2 >> V_3$, recalcular: I_{o1}, I_{o2}, V_{o1}, V_{o2}.
6. Determinar los modelos de pequeña señal en modo diferencial y modo común.

(Datos)
$V_{dd} = 5v$, $W_1/L_1 = W_2/L_2 = 10$, $R_4 = R_5 = 30k\Omega$
$K = 40\mu A/v^2$, $V_{tho} = 0{,}7v$, $\lambda = 0{,}01v^{-1}$ $\gamma = 0{,}8v^{0,5}$,
$\Phi_f = 0{,}6v$



Solución

1. Supongamos que todos los transistores se encuentran en saturación. El transistor m1 es una fuente de corriente, que proporciona una intensidad constante I_{bb} (siempre que $V_b > \mathrm{V_{gg1}} - \mathrm{V_{th0}}$)
   Las suposiciones permiten aplicar simetría tanto a nivel estructural (la estructura y el dimensionamiento son simétricos), como a nivel eléctrico, y por tanto:

$$\begin{aligned} \mathrm{I_{o1}} = \mathrm{I_{o2}} &= \frac{1}{2}\,\mathrm{I_{bb}} \\ \mathrm{V_{GS2}} = \mathrm{V_{GS3}} &= \mathrm{V_{th2}} + \sqrt{\frac{\mathrm{I_{bb}}}{K_n\, W_2/L_2}} \\ \mathrm{V_{th2}} &= \mathrm{V_{th0}} + \gamma\left(\sqrt{\Phi_f + \mathrm{V_b}} - \sqrt{\Phi_f}\right) \\ \mathrm{V_2} = \mathrm{V_3} &= \mathrm{V_b} + \mathrm{V_{gs2}} \\ \mathrm{V_{o1}} = \mathrm{V_{o2}} &= \mathrm{V_{dd}} - \mathrm{R_4}\,\frac{\mathrm{I_{bb}}}{2} \end{aligned}$$

2. Para el dimensionamiento de la fuente de corriente, la especificación $V_b >= 0{,}4v$ nos fija el valor de $\mathrm{V_{GG1}}$.

$$\mathrm{V_{GG1}} = 0{,}4 + \mathrm{V_{th0}} = 1{,}1$$

   Mientras que el valor de $\mathrm{I_b}$ nos permite dimensionar la geometría del mismo.

$$W_1/L_1 = \frac{2\,\mathrm{I_{bb}}}{K_n\,(\mathrm{V_{GS1}} - \mathrm{V_{th0}})^2} = 31{,}25$$

3. **Equilibrio DC**
   Sustituyendo en la expresión del primer apartado:

$$\begin{aligned} \mathrm{I_{o1}} = \mathrm{I_{o2}} &= \frac{\mathrm{I_{bb}}}{2} = 50\mu A \\ \mathrm{V_{o1}} = \mathrm{V_{o2}} &= \mathrm{V_{dd}} - \mathrm{R_4}\,\frac{\mathrm{I_{bb}}}{2} = 3{,}5v \end{aligned}$$

4. **Rango Modo Común**
   Para mantener a m1 en saturación: $\mathrm{V_b} = \mathrm{V_{DS1}} > \mathrm{V_{GS1}} - \mathrm{V_{th0}}$

$$\begin{aligned} \mathrm{V_{GS2}} &\simeq \mathrm{V_{th0}} + \sqrt{\frac{\mathrm{I_{bb}}}{K_n\, W_2/L_2}} = 1{,}05v \\ \mathrm{V_2} &= \mathrm{V_{gs2}} + \mathrm{V_b} > 1{,}45v \end{aligned}$$

   Por otra parte m2 exige: $\mathrm{V_{DS2}} = \mathrm{V_{o1}} - \mathrm{V_b} > \mathrm{V_{GS2}} - \mathrm{V_{th2}}$, que se cumple.

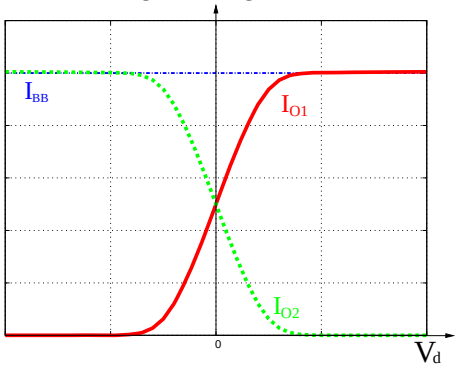
5. **Saturación Modo Diferencial**
   Hemos perdido la simetría eléctrica, por lo que las ecuaciones del primer apartado no se puedan aplicar. Ahora tendremos:

$$\begin{aligned} \mathrm{I_{o1}} + \mathrm{I_{o2}} &= \mathrm{I_{bb}} \\ \mathrm{V_{o1}} &= \mathrm{V_{dd}} - \mathrm{R_4}\,\mathrm{I_{o1}} \end{aligned}$$

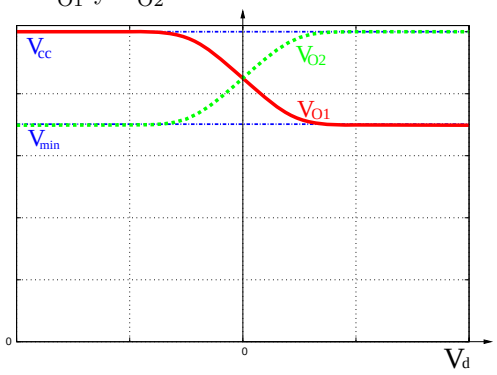
   Supongamos que m1 sigue funcionando en saturación, con $I_b = 100\mu A$ siempre que $V_b > 0{,}4v$. Como la tensión $\mathrm{V_2}$ es más elevada, podemos suponer que el transistor m2 sigue saturado, pero m3 estará cortado, y por tanto:

$$\begin{aligned} \mathrm{I_{o2}} &= 0 \\ \mathrm{V_{o2}} &= \mathrm{V_{dd}} = 5v \\ \mathrm{I_{o1}} &= \mathrm{I_b} = 100\mu A \\ \mathrm{V_{o1}} &= \mathrm{V_{dd}} - \mathrm{R_4}\,\mathrm{I_{bb}} = 2v \end{aligned}$$

La evolución de las corrientes I_{O1} e I_{O2} se puede ver en las siguientes gráficas.



Asimismo, a continuación se muestra la evolución de V_{O1} y V_{O2}



6. Modelos de Pequeña Señal

Como nuestro circuito dispone de dos entradas ($V_2(t)$ y $V_3(t)$), se suele emplear un tratamiento especial.

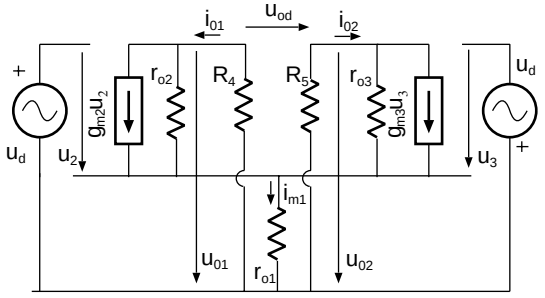
Definimos las tensiones **modo diferencial** y **modo común** como:

$$V_d(t) = \frac{1}{2}(V_2(t) - V_3(t))$$
$$V_c(t) = \frac{1}{2}(V_2(t) + V_3(t))$$

Teniendo como transformada inversa:

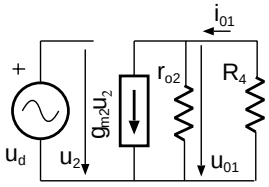
$$V_2(t) = V_c(t) + V_d(t)$$
$$V_3(t) = V_c(t) - V_d(t)$$

Consideremos que nuestro sistema tiene una entrada en **modo diferencial**, tensión modo común constante, y tensión modo diferencial variable ($u_d(t)$).

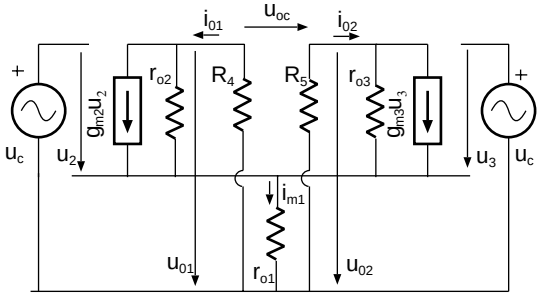
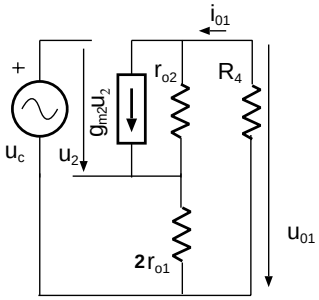


Al aumentar V_2, aumenta V_{GS2} y por tanto I_{O1}.

Del mismo modo, disminuye V_3, disminuye V_{GS3} y por tanto I_{O2}. Si las variaciones son lo suficientemente pequeñas, podemos considerar que el aumento de I_{O1} coincide en módulo con la disminución de I_{O2} y por tanto no habría circulación de intensidad por el transistor $m1$. En el modelo de pequeña señal nos podríamos quedar sólo con la mitad.



De forma análoga podemos considerar una entrada en **modo común**, tensión modo diferencial nula, y tensión modo común variable ($u_c(t)$).



Al aumentar V_2, aumenta V_{GS2} y por tanto I_{O1}. En en transistor m3, las variaciones serían iguales, forzando a una circulación de corriente por m1 para hacerlo posible. Duplicando r_{o1}, podemos obtener un modelo de pequeña señal mitad.