

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 9: Transistores Bipolares (3)

Patricio Parada

pparada@ing.uchile.cl

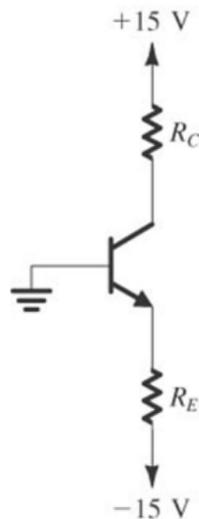
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

1o. de Septiembre de 2009

1 Análisis DC

El transistor de la figura tiene un factor de ganancia $\beta = 100$, y cuando $v_{BE} = 0,7[V]$, $i_C = 2[mA]$.

Diseñe un circuito de forma que $i_C = 2[mA]$ y $v_C = 5[V]$ (el voltaje colector-tierra).



Solución

- Dato: $I_C = 2$ [mA]
- Luego,

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2}{100} = 0,02 \text{ [mA]} \quad (1)$$

y

$$I_E = I_B + I_C = 2,02 \text{ [mA]}. \quad (2)$$

- Por otro lado, $v_C = 5$ [V], y $R_C \cdot I_C = V_{cc} - V_C = 15 - 5 = 10$ [V]

$$\Rightarrow R_C = \frac{10}{2} \text{ [k}\Omega\text{]} = 5 \text{ [k}\Omega\text{]}. \quad (3)$$

Solución (cont.)

- Necesitamos el valor de V_E para determinar R_E :

$$\begin{aligned}
 I_E \cdot R_E &= V_E - V_{EF} \\
 \Rightarrow R_E &= \frac{V_E - (+5)}{2,02 \text{ [mA]}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

- Por otro lado $V_E = -V_{BE}$. Sabemos que $I_C = 1 \text{ [mA]}$ cuando $V_{BE} = 0,7 \text{ [V]}$
- Si $I_C = 2 \text{ [mA]}$, $V_{BE} = ?$
De la característica del transistor:

$$\begin{aligned}
 i_C &= I_S e^{v_{BE}/v_T} \\
 \Rightarrow \frac{1}{2} &= \frac{I_S e^{0,7/v_T}}{I_S e^{v_{BE}/v_T}}
 \end{aligned}$$

Solución (cont.)

$$\frac{1}{2} = e^{(0,7 - v_{BE})/v_T} \Rightarrow 0,7 - v_T \cdot \ln(1/2) = v_{BE}$$

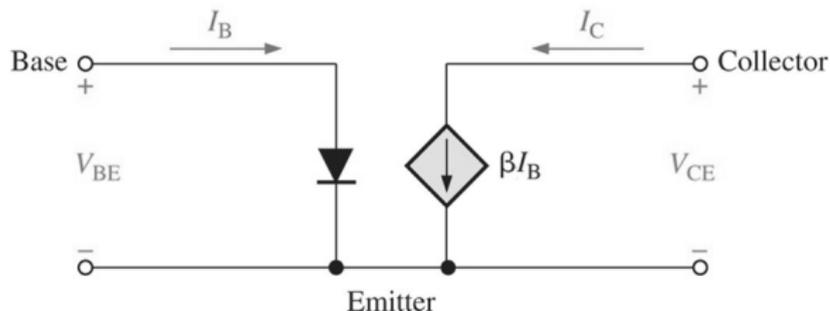
- Como $v_T = 25$ [mV] a temperatura ambiente

$$\Rightarrow V_E = -V_{BE} = -0,717 \text{ [V]}$$

Por lo tanto:

$$R_E = \frac{-0,717 + 15 \text{ [V]}}{2,02 \text{ [mA]}} = 7,07 \text{ [k}\Omega\text{]} \quad (5)$$

- Si el transistor no se encuentra saturado, el modelo EM puede simplificarse al circuito equivalente



- Analizar la respuesta DC de un circuito con un transistor bipolar requiere conocer el modo de operación del mismo.
- Si esto no resulta obvio, uno debe asumir como hipótesis alguno de los modos de operación y verificar mediante el análisis la coherencia de la suposición.

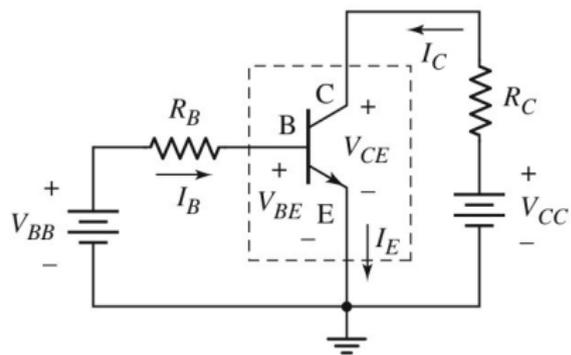
Procedimiento para Análisis DC de Circuitos con BJTs

- 1 Asumir que el transistor está polarizado en el modo activo. En este caso

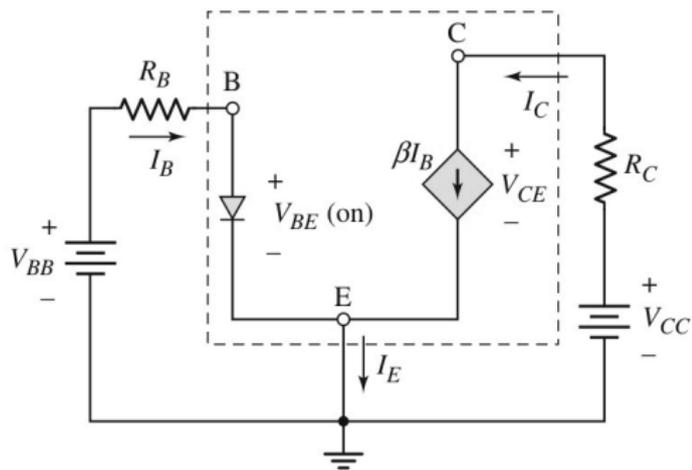
$$V_{BE} = V_{BE(on)}, I_B > 0 \text{ e } I_C = \beta I_B.$$

- 2 Analizar el circuito resultante usando el circuito DC equivalente.
- 3 Evaluar los resultados en luz de lo siguiente:
 - Si $V_{CE} > V_{CE((sat))}$ e $I_B > 0$ el transistor está en el modo activo.
 - Si $I_B < 0$ el transistor está en corte.
 - Si $V_{CE} < V_{CE((sat))}$ el transistor está en saturación.
- 4 De ser necesario, reanalizar cambiando la hipótesis inicial.

Circuito *n*pn de Emisor Común I



(a)



(b)

- Configuración utilizada en muchos circuitos amplificadores.
- La figura muestra un circuito con un *npn* y su equivalente DC.
- En general asumiremos que la juntura BE está polarizada en forma directa con $V_{BE(on)}$.
- Despreciamos el efecto Early y las corrientes de fuga.
- Si $V_{BB} > V_{BE(on)}$ tenemos que

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B}. \quad (6)$$

- Si $V_{BB} < V_{BE(on)}$ el transistor está en corte e $I_B = 0$.

- Considerando el modo activo podemos aplicar

$$I_C = \beta I_B = \frac{\beta(V_{BB} - V_{BE(\text{on})})}{R_B}. \quad (7)$$

y

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} \quad (8)$$

o equivalentemente

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C. \quad (9)$$

Ejemplo

Determine las corrientes de base, colector y emisor y el voltaje entre colector y emisor en el circuito emisor común de la figura.

Datos:

$$V_{BB} = 4 \text{ V}$$

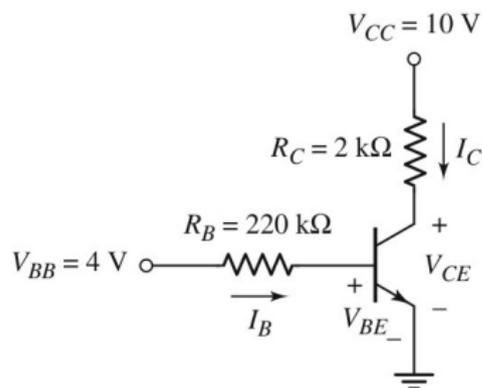
$$V_{CC} = 10 \text{ V}$$

$$V_{BE(\text{on})} = 0,7 \text{ V}$$

$$R_C = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 220 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 200.$$



- Asumimos operación en el modo activo.

- $$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(\text{on})}}{R_B} = \frac{4 - 0,7}{220} = 15 \mu\text{A}.$$

- La corriente de colector es

$$I_C = \beta I_B = 200 \times 15 \mu\text{A} = 3 \text{ mA}.$$

- La corriente de emisor es

$$I_E = (1 + \beta)I_B = 201 \times 15 \mu\text{A} = 3,02 \text{ mA}.$$

- Finalmente

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10 - 3 \times 2 = 4 \text{ V}.$$

- Verificamos que efectivamente el transistor opera en el modo activo:

$$V_{BB} = 4 > 0,7 = V_{BE(\text{on})}$$

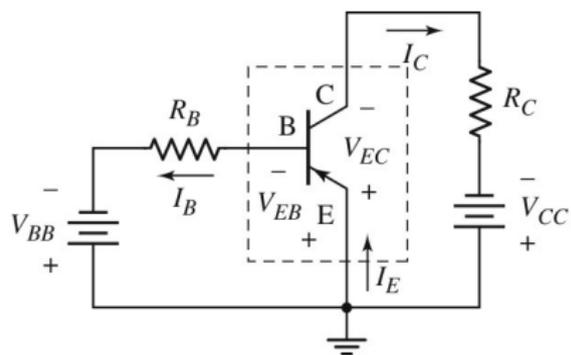
$$V_{CE} = 4 > 0,7 = V_{BE(\text{on})}$$

- En un circuito real es posible que V_{BE} no sea exactamente 0.7, que es lo que hemos asumido al utilizar el modelo de fuente para la juntura BE. El efecto de este “error” es despreciable.
- Existen algunos errores de redondeo en el problema. Notamos que

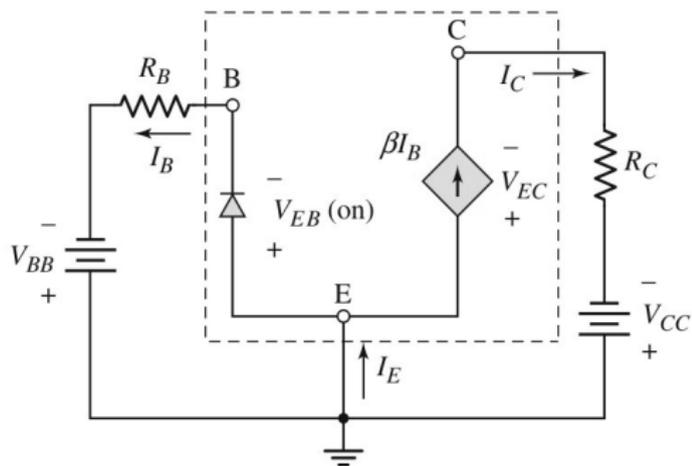
$$I_B = I_E - I_C = 20 \mu\text{A}.$$

en lugar de $15 \mu\text{A}$ como fue determinado originalmente.

Circuito *pnp* de Emisor Común I



(a)



(b)

- Al conectar el emisor a tierra, se deben invertir las polaridades de las fuentes V_{BB} y V_{CC} con respecto al circuito con un transistor *npn*.
- Tenemos

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{EB(\text{on})}}{R_B} \quad (10)$$

$$I_C = \beta I_B \quad (11)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C. \quad (12)$$

Ejemplo

Determine las corrientes de base, colector y emisor y la resistencia R_C en el circuito emisor común de la figura, de forma tal que

$$V_{EC} = \frac{1}{2}V_{CC}.$$

Datos:

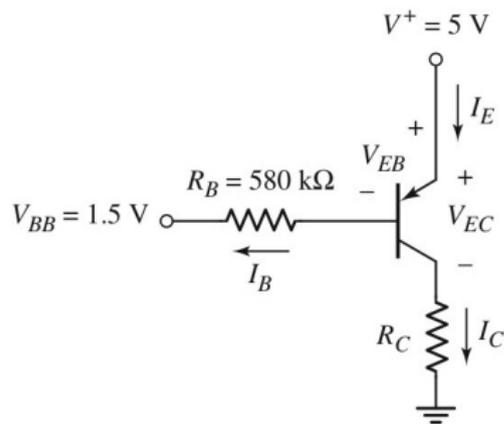
$$V_{BB} = 1,5 \text{ V}$$

$$V_{CC} = 5 \text{ V}$$

$$V_{EB(\text{on})} = 0,6 \text{ V}$$

$$R_B = 580 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 100.$$



- Asumimos operación en el modo activo.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{EB(\text{on})} - V_{BB}}{R_B} = \frac{5 - 0,6 - 1,5}{580} = 5 \mu\text{A}.$$

- La corriente de colector es

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 5 \mu\text{A} = 0,5 \text{ mA}.$$

- La corriente de emisor es

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 101 \times 5 \mu\text{A} = 0,505 \text{ mA}.$$

- Finalmente, como

$$V_{EC} = \frac{1}{2} V_{CC} = 2,5 \text{ V},$$

tenemos que

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{EC}}{I_C} = \frac{5 - 2,5}{0,5} = 5 \text{ k}\Omega.$$

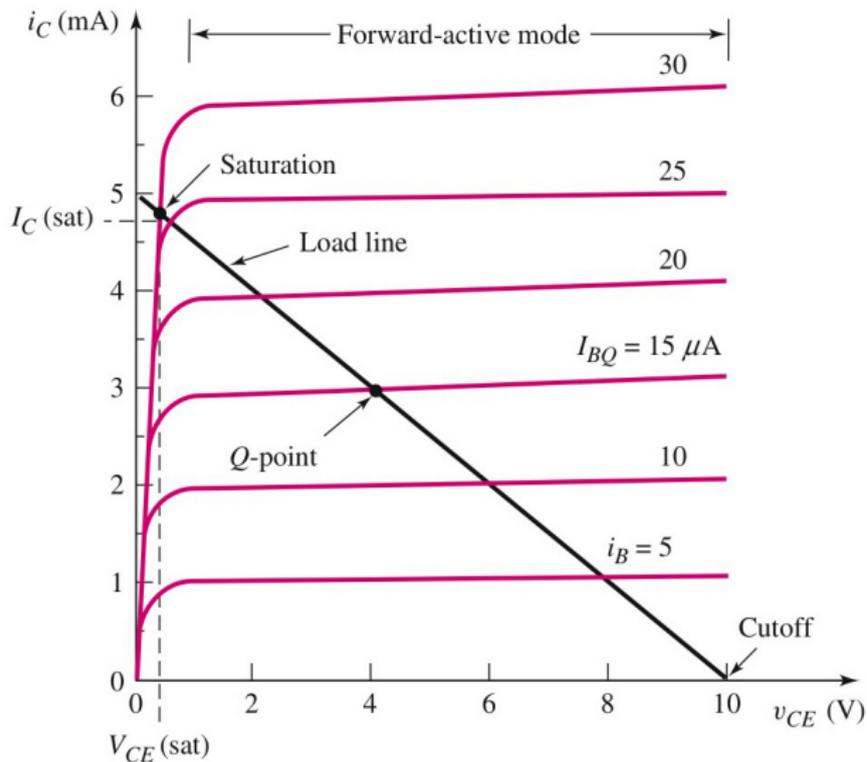
- La recta de carga es una ayuda gráfica que permite visualizar la posición del punto de operación del circuito, así como el modo de operación del transistor.
- La recta de carga se obtiene de la ley de voltajes de Kirchhoff en el loop BE:

$$I_B = \frac{V_{BB}}{R_B} - \frac{V_{BE}}{R_B}. \quad (13)$$

- Podemos plantear una segunda recta de carga en términos de la corriente I_C escribiendo la ley de voltajes de Kirchhoff en el loop CE:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}. \quad (14)$$

Recta de Carga y Modos de Operación II



- Los puntos extremos de la recta de carga se obtienen fijando

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$$

y fijando

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}. \quad (15)$$

- El punto Q (*quiescent point*) es el punto de operación del transistor y corresponde a la coordenada (V_{CEQ}, I_{CQ}) para una determinada corriente de base I_{BQ} .
- El punto de operación se obtiene como la intersección entre la recta de carga y la curva característica V_{CE} vs. I_C para una determinada corriente de base I_{BQ} .

- Si $V_{BB} < V_{BE(\text{on})}$ el transistor está en corte y la corriente $I_B = I_C = I_E = 0$.
- A medida que I_B aumenta, se entra al modo activo hasta un punto límite en el que la corriente I_C comienza a decrecer.
- En este punto el transistor entra en **saturación** .
- Este voltaje $C - E$ es característico de cada transistor y se denota por $V_{CE(\text{sat})}$.

Ejemplo

Determine las corrientes y voltaje en el circuito de modo de saturar el transistor.

Datos:

$$V_{BB} = 8 \text{ V}$$

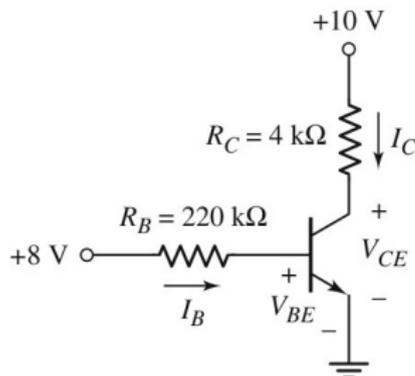
$$V_{CC} = 10 \text{ V}$$

$$V_{BE(\text{on})} = 0,7 \text{ V}$$

$$R_C = 4 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 220 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 100.$$



- Determinemos primero la corriente en la base:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(\text{on})}}{R_B} = \frac{8 - 0,7}{220} = 33,2 \mu\text{A}.$$

- Si asumimos que el transistor está en el modo activo, entonces

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 33,2 \mu\text{A} = 3,32 \text{ mA}.$$

- El voltaje colector-emisor es

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10 - 3,32 \times 4 = -3,28 \text{ V}.$$

- Notamos que $V_{CE} < 0$ lo cual no puede darse en el modo activo. Por lo tanto, el transistor está saturado.
- Esto significa que $V_{CE} = V_{CE}(\text{sat}) = 0,2 \text{ V}$ y por lo tanto

$$V_{CE}(\text{sat}) = V_{CC} - I_C(\text{sat})R_C$$
$$\Rightarrow I_C(\text{sat}) = \frac{V_{CC} - V_{CE}(\text{sat})}{R_C} = \frac{10 - 0,2}{4} = 2,45 \text{ mA.}$$

- Notamos que en este caso

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{2,45}{0,032} = 74 < \beta.$$

- La corriente de emisor es

$$I_E = I_C + I_B = 2,45 + 0,033 = 2,48 \text{ mA.}$$

Determinación punto Q

- Ley de voltajes en loop BE:

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE}(\text{on}) + I_E R_E$$

- Asumimos que el transistor está polarizado en el modo activo

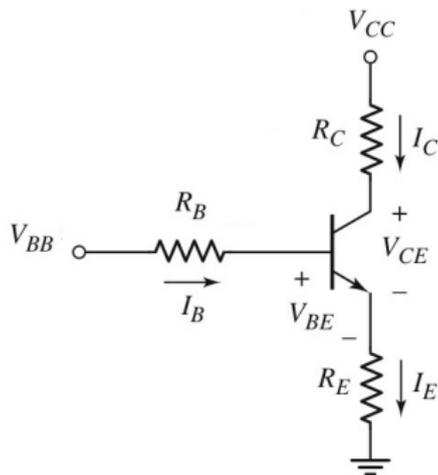
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}(\text{on})}{R_B + (1 + \beta)R_E}. \quad (16)$$

- Escribir

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (1 + \beta)I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E.$$



Determinación Recta de Carga

- Ley de voltajes en loop CE:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \left[R_C + \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) R_E \right] \quad (17)$$

Determinación punto Q

- Ley de voltajes en loop BE:

$$0 = V_{BE(\text{on})} + I_E R_E + V^-$$

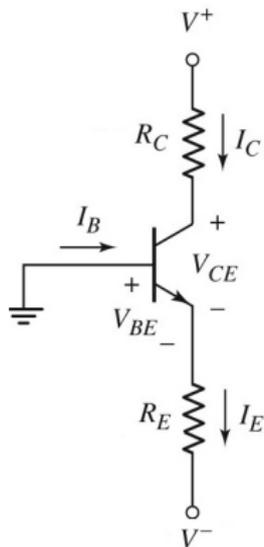
$$\Rightarrow I_E = \frac{-V_{BE(\text{on})} - V^-}{R_E}$$

- Asumimos que el transistor está polarizado en el modo activo

$$I_B = \frac{1}{1 + \beta} I_E$$

$$I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} I_E$$

$$V_{CE} = V^+ - I_C R_C - I_E R_E - V^-$$



Recta de Carga

$$V_{CE} = V^+ - V^- - I_C \left[R_C + \left(\frac{1 + \beta}{\beta} \right) R_E \right]. \quad (18)$$