

Considérese primero la malla circuito base-emisor (malla 1) que se muestra en el diagrama de circuito parcial de la figura 19. Escribiendo la ecuación de voltaje de Kirchhoff para la malla obtenemos

$$M1) \quad -V_{BB} + I_B \cdot R_B + V_{BE} = 0$$

Nótese la polaridad de la caída de voltaje a través de R_B , como se establece por la dirección indicada de I_B . Resolviendo la ecuación para la corriente I_B se tendrá el siguiente resultado:

$$I_B = (V_{BB} - V_{BE}) / R_B$$

En realidad, la ecuación (M1) no es difícil de recordar si se considera simplemente que la corriente de base es la corriente a través de R_B y, por la ley de Ohm, esa corriente es el voltaje a través de R_B dividido entre la resistencia R_B . El voltaje a través de R_B es el voltaje aplicado V_{BB} en uno de los extremos menos la caída a través de la unión base-emisor (V_{BE}).

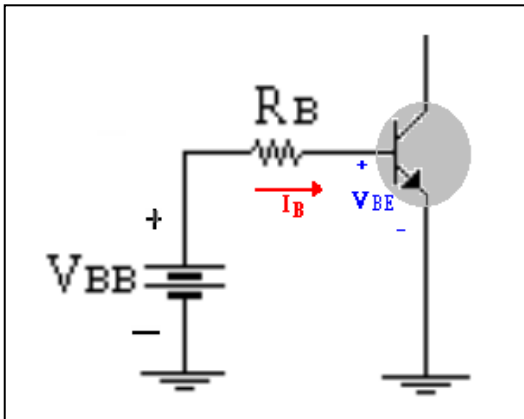


Figura 19 Malla de base-emisor

Además, puesto que la fuente de voltaje V_{BB} es constante y el voltaje de base a emisor V_{BE} es aproximadamente constante, la selección de un resistor de base, R_B , establece el nivel de la corriente de base para el punto de operación.

Como desconocemos los valores de V_{BE} e I_B respectivamente, la ecuación (M1) representará una recta geométrica. Por lo tanto, tenemos, en esencia, una ecuación de red (M1) y un conjunto de características que utilizan las mismas variables (curva C de la figura 18). La solución común de las dos ocurre donde las restricciones establecidas por cada una se satisfacen simultáneamente. En otras palabras, esto es equivalente a graficar la recta entregada por M1, sobre la curva característica de entrada (Figura #18 C) y el punto Q será entonces donde se interceptan ambas figuras, lo que es similar a encontrar la solución de dos ecuaciones simultáneas: una establecida por la red y otra por las características del dispositivo.

Para graficar una recta de carga se necesita obtener 2 puntos y luego trazar una línea. Por otro lado, para trazar un punto se requiere obtener previamente el valor de una de las variables, para nuestro caso V_{BE} o bien I_B . Por ejemplo, para obtener el punto P1 asumamos que $I_B = 0$, luego al reemplazar en M1 se tiene:

$$M1) \quad -V_{BB} + (0) \cdot R_B + V_{BE} = 0 \text{ luego, } V_{BE} = V_{CC}. \text{ Esto quiere decir que el punto 1 (P1) será:}$$

P1: $I_B = 0$ y $V_{BE} = V_{BB}$ y se encuentra sobre el eje horizontal de la figura 18 C.

Para obtener el punto 2, asumimos que $V_{BE} = 0$. Reemplazando en la ecuación M1 se tendrá:

$$M1) \quad -V_{BB} + I_B \cdot R_B + (0) = 0, \text{ es decir, } I_B = V_{BB} / R_B. \text{ Por lo tanto, el punto 2 (P2) será:}$$

P2: $I_B = V_{BB} / R_B$ y $V_{BE} = 0$. Este punto se encuentra sobre el eje vertical de la figura 18 C.

Como se muestra en la figura 20. La unión de ambos puntos se denomina recta de entrada y la intersección con la curva se encuentra el punto Q para la entrada, obteniendo con ello los valores de I_{BQ} y V_{BEQ} respectivamente.

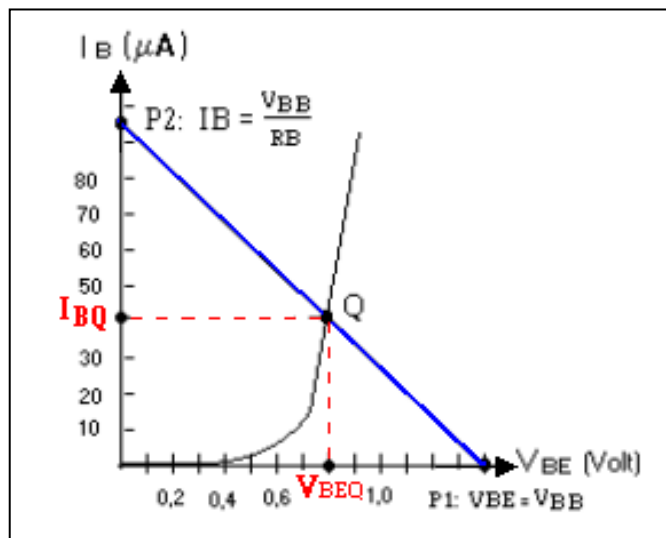


Figura #20: Punto Q.

La sección de colector-emisor de la red aparece en la figura 21 con la dirección indicada de la corriente I_C y la polaridad resultante a través de R_C .

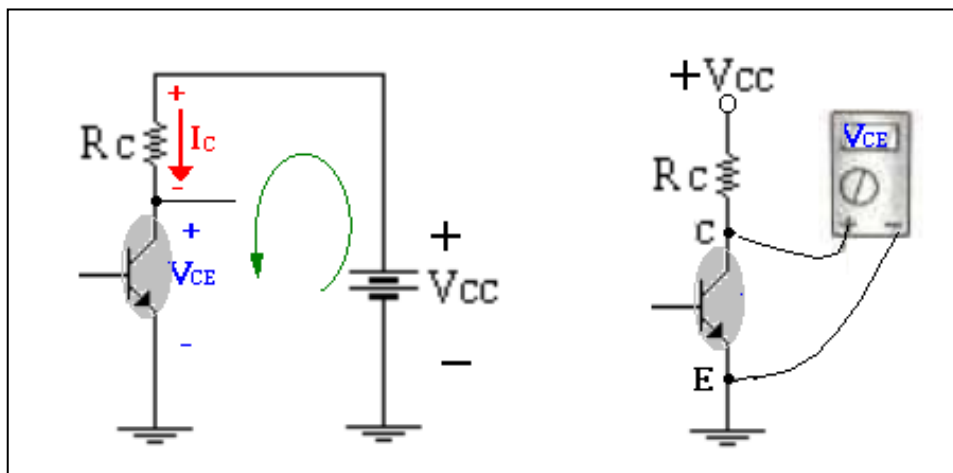


Figura #21: Malla de salida o de colector-emisor

Es interesante notar que, en vista de que la corriente de base se controla por el nivel de R_B e I_C se relaciona con I_B por una constante β la magnitud de I_C no es una función de la resistencia R_C . El cambio de R_C a cualquier nivel no afectará el nivel de I_B o I_C en tanto que permanezcamos en la región activa del dispositivo. Sin embargo, como veremos posteriormente, el nivel de R_C determinará la magnitud de V_{CE} , el cual es un parámetro importante.

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff en la dirección de las manecillas del reloj a lo largo de la malla indicada en la figura 4.5, se obtendrá el resultado siguiente:

$$M2) \quad -V_{CC} + V_{CE} + I_C * R_C = 0 \quad \text{o bien: } V_{CE} = V_{CC} - I_C * R_C.$$

En otras palabras, se puede decir que el voltaje a través de la región de colector-emisor de un transistor en la configuración de polarización fija es la fuente de voltaje menos la caída a través de R_C . Como un breve repaso de la notación de subíndice y doble subíndice, recuérdese que $V_{CE} = V_C - V_E$, donde V_{CE} es el voltaje de colector a emisor y V_C y V_E son los voltajes de colector y emisor a tierra, respectivamente. Pero *en este caso*, ya que $V_E = 0 \text{ V}$, tenemos $V_{CE} = V_C$. Además, puesto que $V_{BE} = V_B - V_E$ y $V_E = 0 \text{ V}$, entonces $V_{BE} = V_B$.

Téngase en cuenta que los niveles de voltaje como el de V_{CE} se determinan situando la punta roja (positiva) del voltímetro en la terminal de colector con punta negra (negativa) en la terminal del emisor, como se ilustra en la figura 21 V_C es el voltaje del colector a tierra y se

mide como se muestra en la misma figura. En este caso, las dos lecturas son idénticas, pero en las redes que se verán más adelante, ambas pueden llegar a ser bastante diferentes. Comprender con claridad la diferencia entre las dos mediciones probará ser de suma importancia en la detección de fallas de las redes de transistores.

Las características del dispositivo de I_C contra V_{CE} se proporcionan en la figura 18b. Ahora debemos sobreponer la línea recta definida por la ecuación M2 sobre las curvas características. El método más directo para trazar la ecuación (M2) sobre las características de salida es empleando el intercepto con los ejes. Si elegimos I_C con un valor de 0 mA, estaremos especificando el eje horizontal como la línea sobre la cual se localizará un punto tal que: P11: $V_{CE} = V_{CC}$ para $I_C = 0$ mA. Definiendo un punto para la línea recta, como se ilustra en la figura 22. Si ahora escogemos el valor de 0 V para V_{CE} , con el que se establece el eje vertical como la línea sobre la cual se definirá el segundo punto, encontraremos que I_C se determina por P22: $I_C = V_{CC} / R_C$. La línea resultante sobre la gráfica de la figura 22 se denomina *recta de carga*, puesto que está definida por el resistor de carga R_C . Al resolver para el nivel resultante de I_{BQ} , el punto Q real se puede establecer como se ilustra en la figura 22.

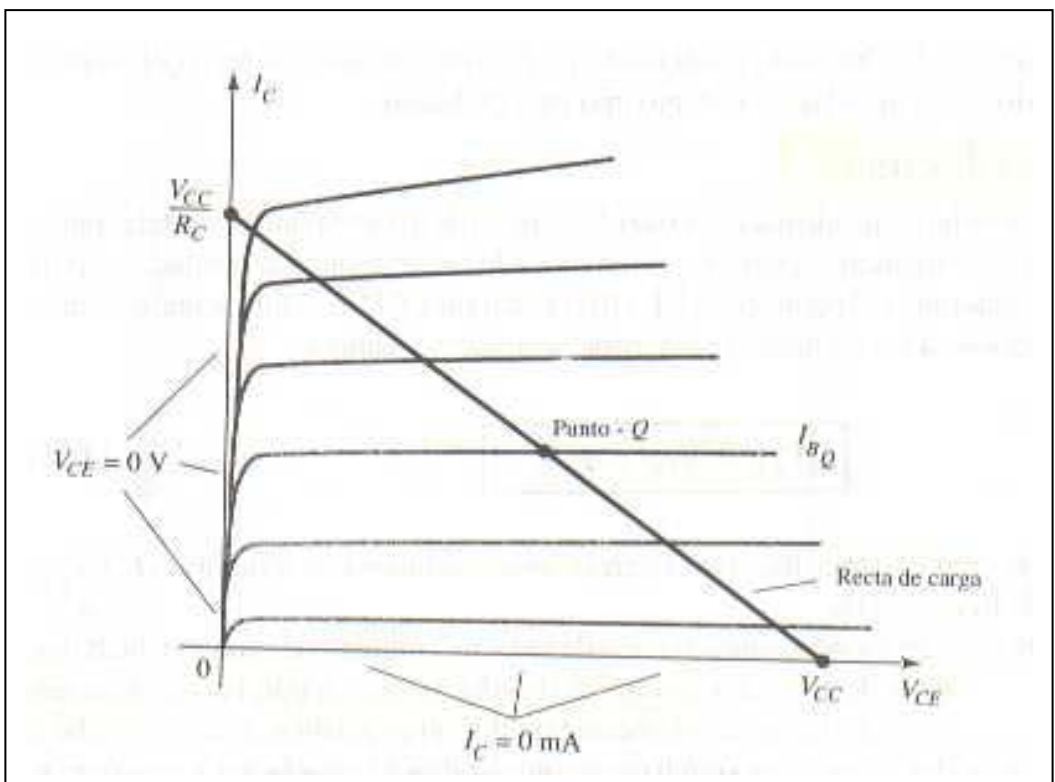


Figura 22: Recta de carga de polarización fija.

Si el nivel de I_{BQ} se modifica al variar el valor de R_B , el punto Q se mueve hacia arriba o hacia abajo de la recta de carga, como se muestra en la figura 23. Si V_{CC} se mantiene fijo y R_C cambia, la recta de carga subirá como se representa en la figura 24. Si I_{BQ} es la que se mantiene constante, el punto Q se trasladará como se ilustra en la misma figura.

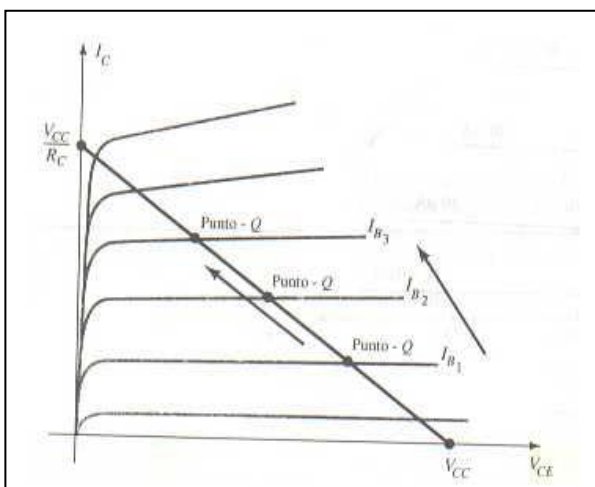


Figura 23: Variación de I_{BQ}

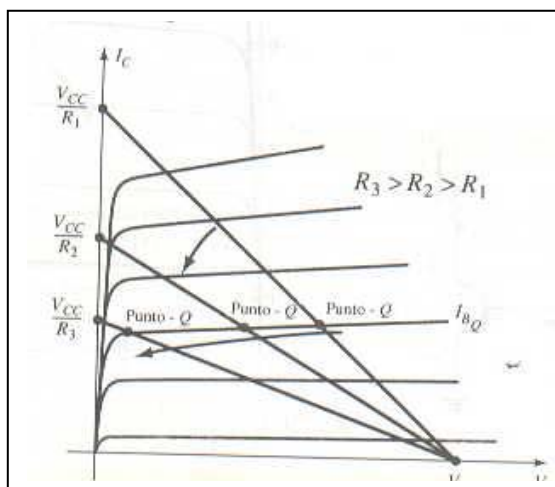


Figura #24: Variación de R_c

Si los valores de I_{BQ} y R_c se mantienen constantes, y es el valor de V_{CC} es el que varía, la recta de carga se desplazará como se muestra en la figura 25.

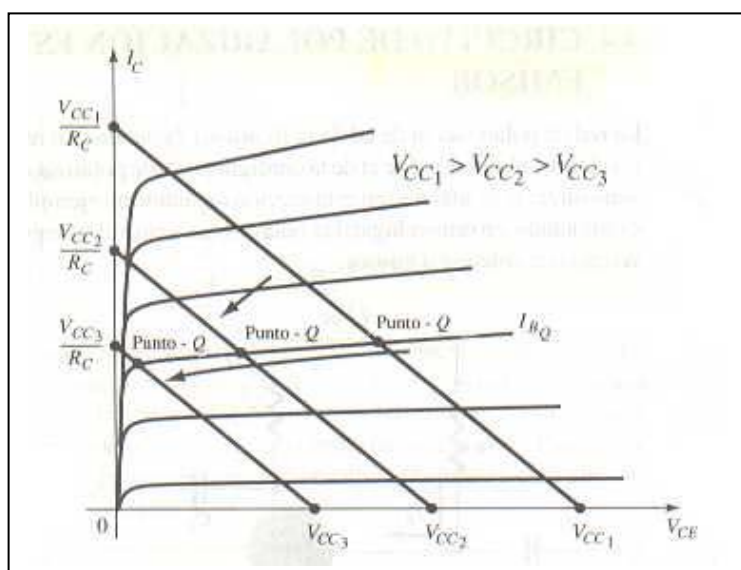


Figura 25: Efecto de la disminución en los valores de V_{CC} sobre la recta de carga y el punto Q.

Si no se tienen las curvas características, se puede obtener el punto Q mediante una aproximación, esto es, considerando que la curva característica de entrada representa a un diodo, se puede obtener que el voltaje Base-emisor corresponde al voltaje de codo del diodo, esto es, si el transistor es de Silicio su valor será de $V_{BEQ} = 0,7$ Volts y reemplazando dicho valor en la ecuación M1) - $V_{BB} + I_B * R_B + V_{BE} = 0$, luego

$$-V_{BB} + I_B * R_B + (0,7 \text{ Volt}) = 0 \text{ o bien: } I_{BQ} = (V_{BB} - 0,7 \text{ Volt}) / R_B.$$

Obtenido el valor de I_{BQ} , se puede obtener el valor de I_{CQ} mediante la ecuación $I_C \approx \beta * I_B$.

Esto es, $I_{CQ} = \beta * I_{BQ}$. Mediante la malla 2 se puede obtener el valor del V_{CE} . Así:

$$M2) - V_{CC} + V_{CE} + I_C * R_C = 0 \text{ o bien: } V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} * R_C.$$

Es importante indicar que la corriente de emisor I_{EQ} se puede obtener como la suma de las otras corrientes, esto es, $I_{EQ} = I_{CQ} + I_{BQ}$.

Saturación del transistor

El termino *saturación* se aplica a cualquier sistema, donde los niveles han alcanzado sus valores máximos. Una esponja saturada es aquella que no puede contener una gota más de liquido. Para un transistor que opera en la región de saturación, la corriente es un valor máximo *para el diseño particular*. Modifíquese el diseño y el correspondiente nivel de saturación podrá elevarse o decaer. Por supuesto, el mayor nivel de saturación se define por la máxima corriente

de colector, tal como se proporciona en la hoja de especificaciones. Las condiciones de saturación se evitan por lo general debido a que la unión de base a colector ya no está inversamente polarizada y la señal amplificada de salida estará distorsionada. Un punto de operación en la región de saturación se representa en la figura 26a. Nótese que se encuentra en una región donde se unen las "curvas de características y el voltaje de colector a emisor se halla en o sobre V_{CEsat} . Además, la corriente de colector es relativamente alta sobre la curva característica.

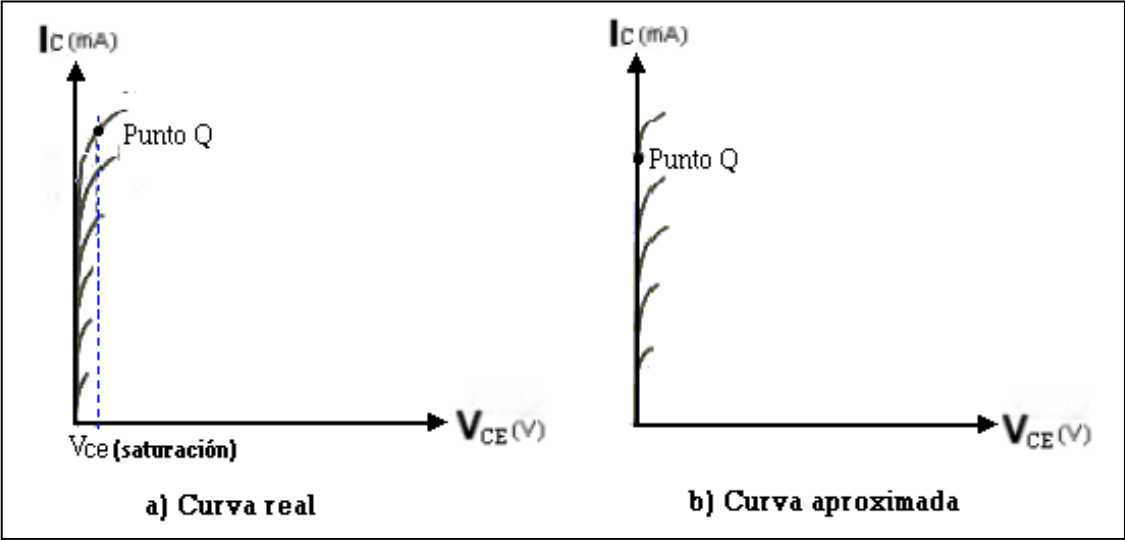


Figura 26: Región de saturación (a) real (b) aproximada

Si juntarnos las curvas de la figura 26a con las que aparecen en la figura 26b, se llegará a un método rápido y directo para determinar el nivel de saturación. En la figura 26b la corriente es relativamente alta y se supone que el voltaje V_{CE} es de cero voltios. Al aplicar la ley de Ohm, la resistencia entre las terminales de colector y emisor se puede determinar como sigue:
 $R_{CE} = V_{CE} / I_{C\ sat} = 0\ Ohms$

Aplicando los resultados al esquema de la red resultaría la configuración de la figura 27.

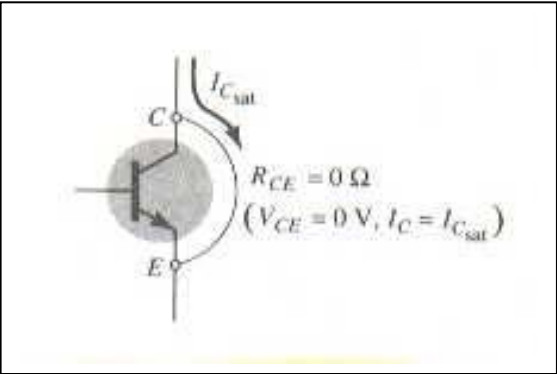


Figura 27 Determinación de I_{Csat} .

Por consiguiente, en el futuro, si hubiera necesidad inmediata de conocer la corriente máxima de colector aproximada (nivel de saturación) para un diseño en particular, simplemente inserte un corto circuito equivalente entre el colector y el emisor del transistor y calcule la corriente de colector resultante. En resumidas cuentas, haga $V_{CE}=0V$. Para la configuración de polarización fija de la figura 18, se utilizó el corto circuito, ocasionando que el voltaje a través de R_C sea el voltaje aplicado V_{CC} . La corriente de saturación resultante para la configuración de polarización fija es: $I_{Csat} = V_{CC} / R_C$ (Figura #28).

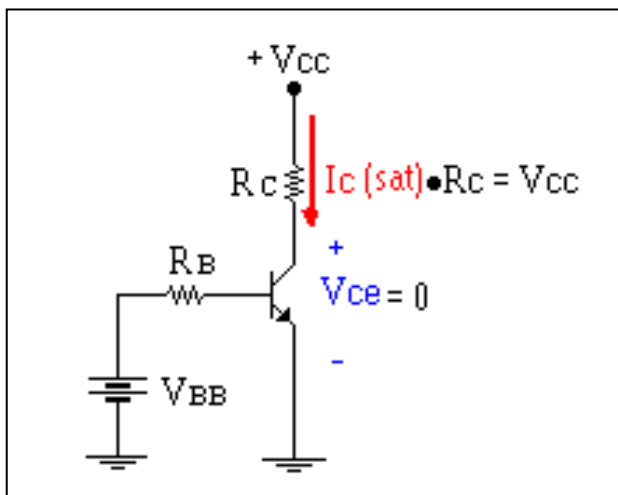


Figura 28: Determinación de I_{Csat} , para la configuración de polarización fija.

Una vez que se conoce I_{Csat} , tenemos una idea de la máxima corriente de colector posible para el diseño elegido, y del nivel bajo el cual permanecer si esperamos una amplificación lineal.

En resumen se puede decir que:

- Sí el transistor está en **Saturación** el V_{CE} es casi cero y su corriente de colector es máxima. El circuito que más se asemeja es el de un interruptor cerrado
- Sí la corriente de base es cero, el transistor está en **Corte** el V_{CE} es casi la fuente V_{CC} y su corriente de colector es mínima (casi cero). El circuito que más se asemeja es el de un interruptor abierto.
- Sí el transistor no está en la zona de **Saturación** ni en la zona de **Corte**, entonces se dice que se encuentra en la zona **activa** o zona **lineal**.

La figura #29 muestra el comportamiento del transistor en la zona de corte y saturación respectivamente

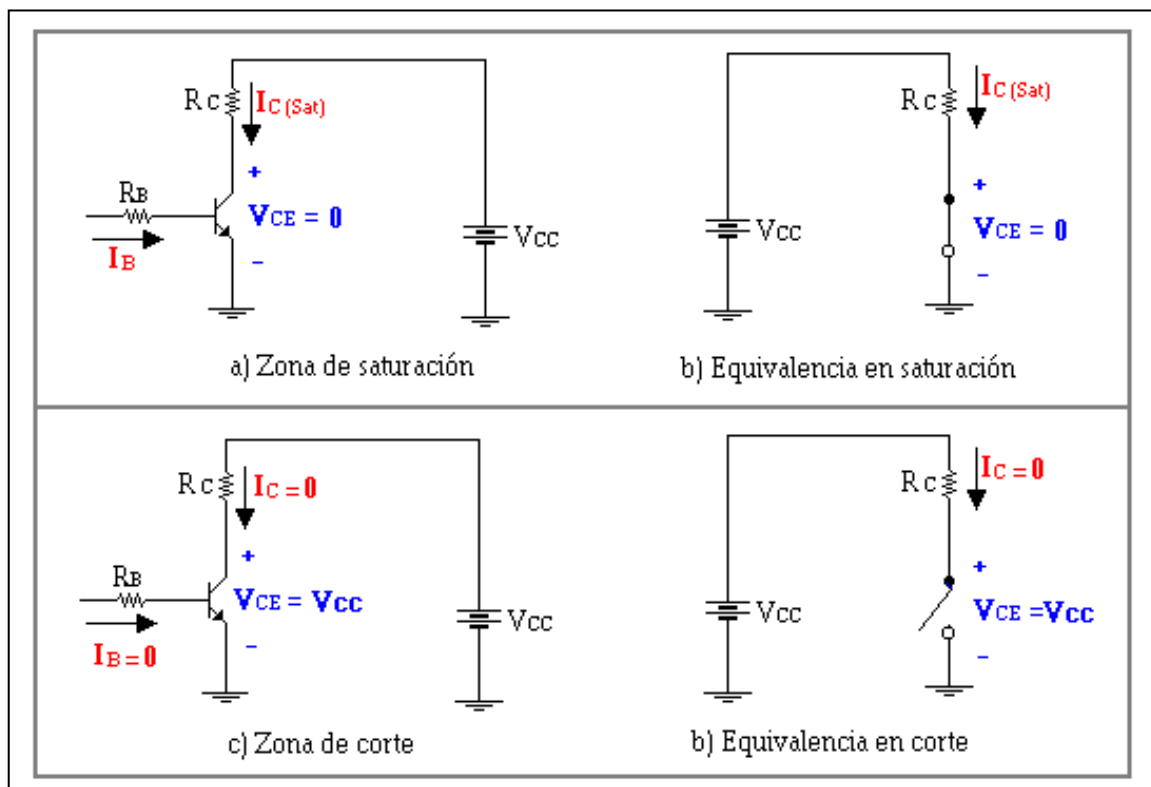


Figura 29: Equivalencias del transistor en las zonas de saturación y corte

Estabilidad:

Considere el circuito de la figura 30

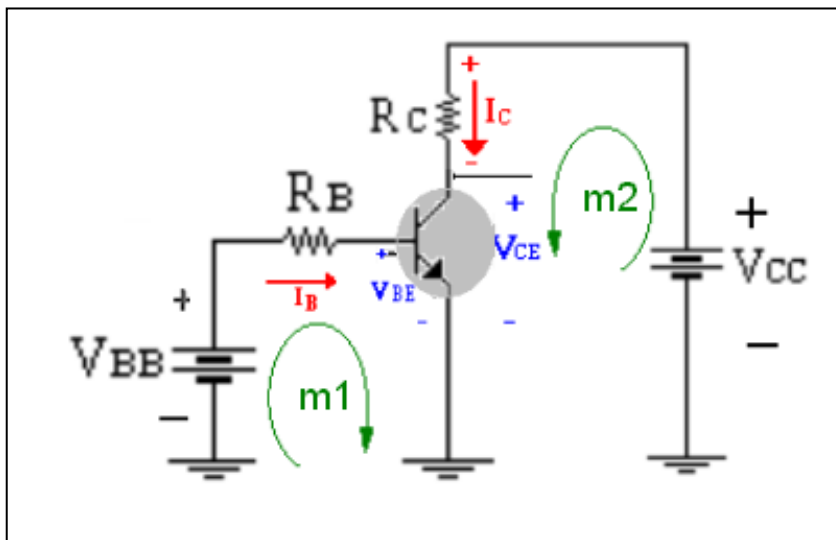


Figura #30: Circuito de polarización

De la figura #30 se tiene:

M1) - $V_{BB} + I_B \cdot R_B + V_{BE} = 0$, luego $I_{BQ} = (V_{BB} - V_{BEQ}) / R_B$, esto quiere decir que una variación del V_{BEQ} producirá un corrimiento de la corriente I_{BQ} . Si consideramos además que este voltaje V_{BEQ} es dependiente de la temperatura, entonces podemos decir que I_{BQ} también es dependiente de la temperatura. Por otro lado, se tiene que $I_{CQ} \approx \beta \cdot I_{BQ}$ luego, al variar la corriente de base, también variará la corriente de colector, más aun si consideramos que el parámetro β también varía con la temperatura, en efecto, si uno calienta el transistor se dará cuenta que el parámetro β aumentará, es más, este parámetro varía de un transistor a otro.

Mediante la malla 2 se tiene:

M2) - $V_{CC} + V_{CE} + I_C \cdot R_C = 0$ o bien: $V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_C$.

Como se puede observar, un aumento en I_{BQ} producirá un aumento en I_{CQ} y una disminución en el voltaje V_{CEQ} , lo que quiere decir que un transistor que esta trabajando en la zona activa, mediante el aumento de la temperatura o al ser cambiado por otro transistor, este pudiera quedar en la zona de saturación con un comportamiento totalmente distinto.

Para evitar el corrimiento del punto Q, producto de la temperatura y del es que se conecta en serie al emisor una resistencia como se muestra en la figura 31.

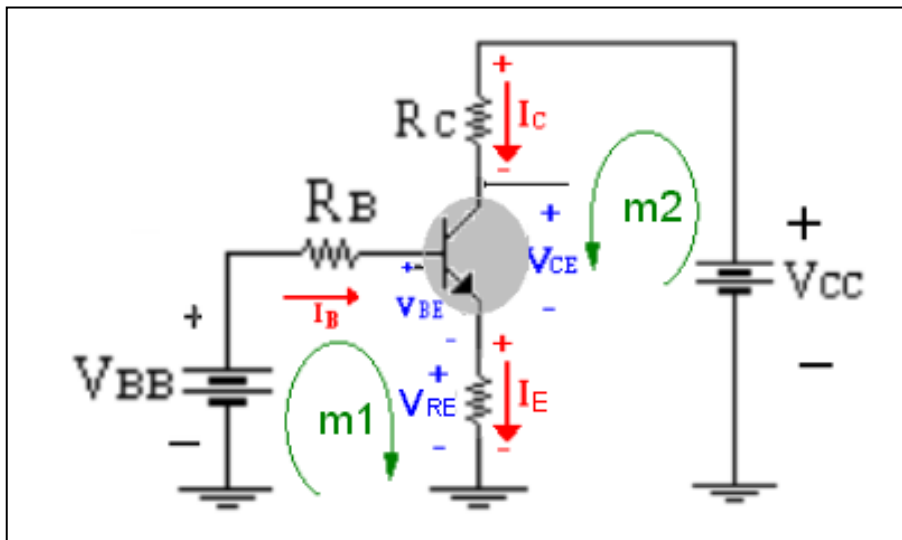


Figura #31: Circuito de estabilización

De la figura #31 se tiene:

M1) - $V_{BB} + I_B \cdot R_B + V_{BE} + V_{RE} = 0$, o bien - $V_{BB} + I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E = 0$, pero,

$I_E \approx (\beta + 1) \cdot I_B$, reemplazando en el punto Q se tiene:

- $V_{BB} + I_{BQ} \cdot R_B + V_{BEQ} + (\beta + 1) \cdot I_{BQ} \cdot R_E = 0$, factorizando y despejando para I_{BQ} se Tiene:

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E} \quad \text{Luego, } I_{CQ} \approx \beta \cdot I_{BQ}$$

Despejando para I_{CQ} se tiene:

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} = \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

Si se asume que $(\beta + 1) \cdot R_E \gg R_B$ y $\beta \gg 1$, entonces la ecuación puede reducirse a:

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_{BQ} \approx \beta \cdot \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{\beta \cdot R_E} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_E}$$

Como se puede apreciar, la corriente de colector I_{CQ} es independiente de β . por tanto, esta corriente se mantendrá inalterable por variaciones que pueda tener β producto de variaciones de temperatura o cambio del dispositivo. Conocido I_{CQ} , las cantidades restantes de la red pueden encontrarse del mismo modo que se hizo para la configuración polarizada de emisor.

Mediante la malla 2 se tiene:

M2) - $V_{CC} + V_{CE} + I_C \cdot R_C + I_E \cdot R_E = 0$ o bien: $V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot R_C - I_E \cdot R_E$

Esto es: $V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \cdot (R_C + R_E)$. Nuevamente este voltaje es independiente de β , ya que I_{CQ} lo es.

La razón de esta estabilidad, radica fundamentalmente en el hecho de producir una realimentación negativa, en efecto, un aumento en la corriente colector I_{CQ} y por tanto en la corriente de emisor (por ejemplo por aumento de la variable β), producirá que aumento en el voltaje en R_E , esto es, V_{RE} generando una disminución en la corriente de base I_{BQ} y por ende una disminución en la corriente de colector I_{CQ} . Esta situación mantiene estable el punto Q y la condición necesaria para que se produzca tal estabilidad es que $(\beta + 1) \cdot R_E \gg R_B$. Por otro lado, tampoco es bueno hacer que R_E sea muy elevada, pues se tendrá una pérdida de potencia que en ningún caso es conveniente y se debe tener en cuenta al momento de polarizar el circuito la relación de estabilidad v/s la pérdida de potencia, por lo tanto, una relación de 10 veces como mínimo es decir que $(\beta + 1) \cdot R_E \geq 10 \cdot R_B$, permitirá obtener una buena estabilidad con una adecuada pérdida de potencia.

Polarización con divisor de voltaje.

En las configuración de la figura 30, la corriente de polarización I_{CQ} y del voltaje V_{CEQ} es función de la ganancia de corriente (β) del transistor. Sin embargo, ya que β es sensible a la temperatura, y el valor real de beta normalmente no está bien definido, sería deseable desarrollar un circuito de polarización menos dependiente, de hecho, independiente de la beta del transistor. La configuración de polarización con divisor de voltaje de la figura 32 es una red de ese tipo. Si se analiza sobre una base exacta, la sensibilidad a los cambios en beta es bastante pequeña si los parámetros del circuito se escogen apropiadamente, los niveles resultantes de I_{CQ} y V_{CEQ} pueden ser casi totalmente independientes de beta. Recuerde que el punto Q se define por un nivel fijo de I_{CQ} y V_{CEQ} .

El nivel de I_{BQ} se modificará con el cambio en beta, pero el punto de operación sobre las características, definido por I_{CQ} y V_{CEQ} puede permanecer fijo si se utilizan los parámetros apropiados del circuito.

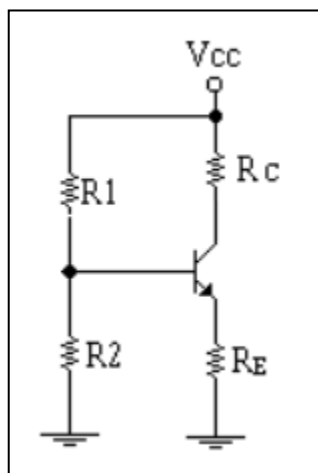


Figura 32: Configuración de polarización con divisor de voltaje.

Análisis

La parte de entrada de la red de la figura 33 puede volverse a dibujar, como se muestra en la figura 33, para el análisis de cd. La red de Thévenin equivalente para la red a la izquierda de la terminal de base puede hallarse entonces de la siguiente manera:

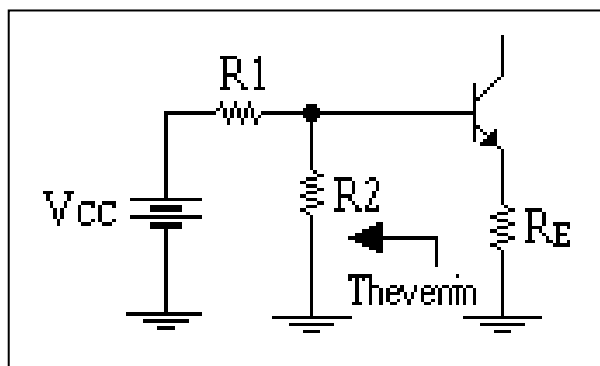


Figura 33 Entrada para la red de la figura 30

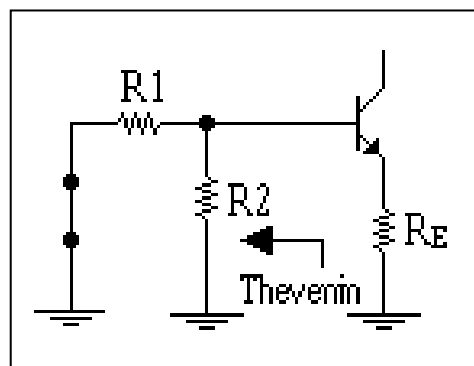


Figura 34 Determinación de R_{Th}

- 1.- R_{Th} : La fuente de voltaje se reemplaza por un corto circuito equivalente, como se ilustra en la figura 34 donde R_{Th} corresponde a $R1$ en paralelo con $R2$.
- 2.- E_{Th} : La fuente de voltaje V_{CC} se reintegra a la red y el voltaje Thévenin del circuito se determina aplicando la regla del divisor de voltaje que muestra la figura #35 donde:

$$E_{TH} = V_{R2} = \frac{R2 \cdot V_{CC}}{R1 + R2}$$

La red Thévenin se vuelve a dibujar entonces, como se ilustra en la figura 35 e I_{BQ} se puede determinar al aplicar en primer lugar la ley de voltaje de Kirchhoff en dirección de las

manecillas del reloj para la malla indicada: $-E_{Th} + I_B * R_{Th} + V_{BE} + I_E * R_E = 0$. Sustituyendo $I_E = (\beta + 1)I_B$ y resolviendo I_B , llegamos a

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1) * R_E}$$

Aunque inicialmente la ecuación parece distinta de las desarrolladas con anterioridad, su análisis es semejante, el denominador contiene la resistencia de base más el resistor de emisor reflejado por $(\beta + 1)$.

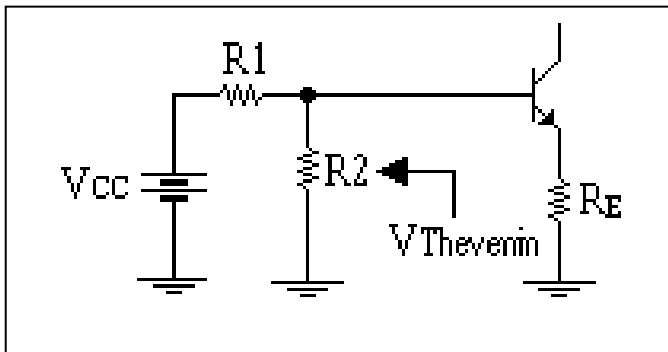


Figura 35 Determinación de E_{Th}

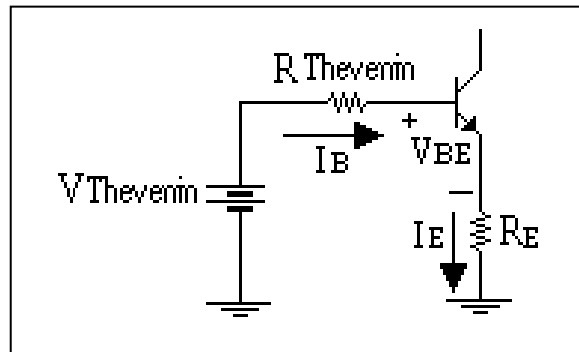


Figura 36 Circuito equivalente de Thévenin

Si consideramos que $I_C = \beta * I_B$, entonces podemos reemplazar y obtener la ecuación 21 como:

$$21) \quad I_C = \beta * \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1) * R_E}$$

Luego, si consideramos que $\beta \gg 1$ y además que $(\beta + 1) * R_E \gg R_{Th}$. Entonces podemos aproximar la ecuación 21 por una ecuación mas simple como se muestra en la ecuación 22. Y consecuentemente la ecuación 23.

$$22) \quad I_C \approx \beta * \frac{E_{Th} - V_{BE}}{\beta * R_E}$$

$$23) \quad I_C \approx \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_E}$$

Como se puede apreciar en la ecuación 23, la corriente de colector I_{CQ} es independiente de β . por tanto, esta corriente se mantendrá inalterable por variaciones que pueda tener β producto de variaciones de temperatura o cambio del dispositivo. Conocido I_{CQ} , las cantidades restantes de la red pueden encontrarse del mismo modo que se hizo para la configuración polarizada de emisor. Esto es:

$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} * (R_C + R_E)$. Nuevamente este voltaje es independiente de β , ya que I_{CQ} lo es.