

TEMA 7. EL TRANSISTOR BIPOLAR BJT.

7 EL TRANSISTOR BIPOLAR BJT.

El transistor bipolar de unión (BJT, *Bipolar Junction Transistor*) es un dispositivo electrónico de tres terminales, formado por un cristal de silicio en el que se crea una región de tipo n entre dos de tipo p , o bien una de tipo p entre dos de tipo n . En el primer caso el transistor se denomina $p-n-p$ y en el segundo $n-p-n$.

Las tres regiones que se forman y los terminales extraídos desde ellas se denominan de la siguiente forma:

- **E: Emisor.** Es una región muy dopada. Su nombre se debe a que funciona como emisor de los portadores de carga. Cuanto más dopaje tenga el emisor, más cantidad de portadores podrá aportar a la corriente.
- **B: Base.** Es la región central, estrecha y poco dopada, que se encarga de controlar el paso de los portadores. Con estas características conseguimos que en esta zona exista poca recombinación, y prácticamente todos los portadores que proceden del emisor pasen al colector. Notar que si esta zona no es estrecha, el dispositivo podría no funcionar como un transistor y hacerlo como si se tratase de dos diodos en oposición.
- **C: Colector.** Es la región unida a la base, de extensión más amplia. cuyo objeto es captar los portadores inyectados en dicha región desde el emisor.

Se observa que el transistor bipolar es un dispositivo asimétrico¹, en contraste con el MOSFET que es simétrico, y por tanto E y C no son intercambiables.

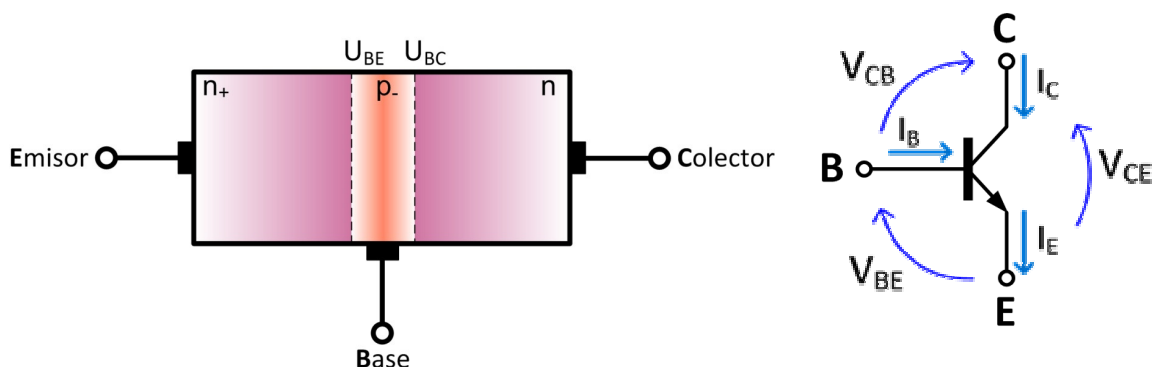


Fig. 1: Estructura de un transistor $n-p-n$. Símbolo, tensiones y corrientes.

¹ La asimetría significa que intercambiando el colector y el emisor hace que el transistor deje de funcionar en la zona activa y comience a funcionar en inversa.

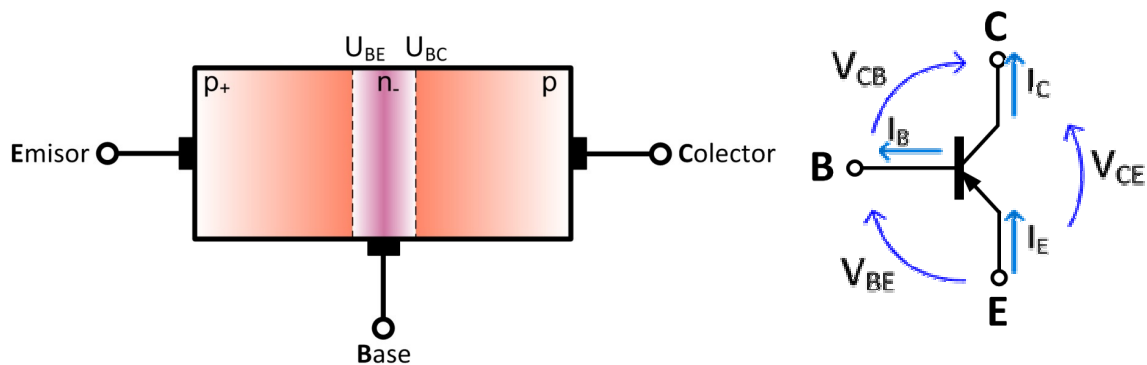


Fig. 2. Estructura de un transistor p-n-p. Símbolo, tensiones y corrientes.

Para las tensiones y corrientes indicadas en los símbolos de los transistores, tanto del n-p-n como del p-n-p, se cumple:

$$I_E = I_C + I_B,$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}.$$

Este transistor recibe el nombre de "bipolar" por el hecho de que la corriente que lo atraviesa está formada por dos tipos de portadores: mayoritarios al atravesar las regiones de emisor y colector, y minoritarios en la de base.

7.1. COMPONENTES DE LA CORRIENTE DEL TRANSISTOR.

En el estudio del diodo se pudo observar cómo aproximadamente la unión p-n se comportaba como un cortocircuito ($V \approx 0$), o bien como un circuito abierto ($I \approx 0$) dependiendo de si estaba polarizada en directa o en inversa, respectivamente.

El transistor está formado por dos uniones p-n, por lo que pueden conseguirse cuatro combinaciones de polarización posibles:

| Unión E-B | Unión C-B | Zona de funcionamiento | Modelo aproximado |
|-----------|-----------|------------------------|-------------------|
| Directo | Directo | Saturación | Cortocircuito |
| Directo | Inverso | Activa | Amplificador |
| Inverso | Inverso | Corte | Circuito abierto |
| Inverso | Directo | Activa inversa | No se utiliza |

7.1.1. Polarización del transistor bipolar en zona activa.

Con el transistor bipolar en zona activa, la unión base-emisor (B-E) estará polarizada en directa y la base-colector (B-C) en inversa.

El efecto transistor consiste en que la mayor parte de los portadores mayoritarios inyectados desde el emisor en la base (corriente en directa de la unión E-B), no se recombinan en esta región poco dopada y muy estrecha, y por la polarización son arrastrados, al igual que los portadores minoritarios de la misma, hacia el colector formando parte de la corriente inversa de la unión B-C. La pequeña parte que se recombina en la región de base forma parte de la corriente de base.

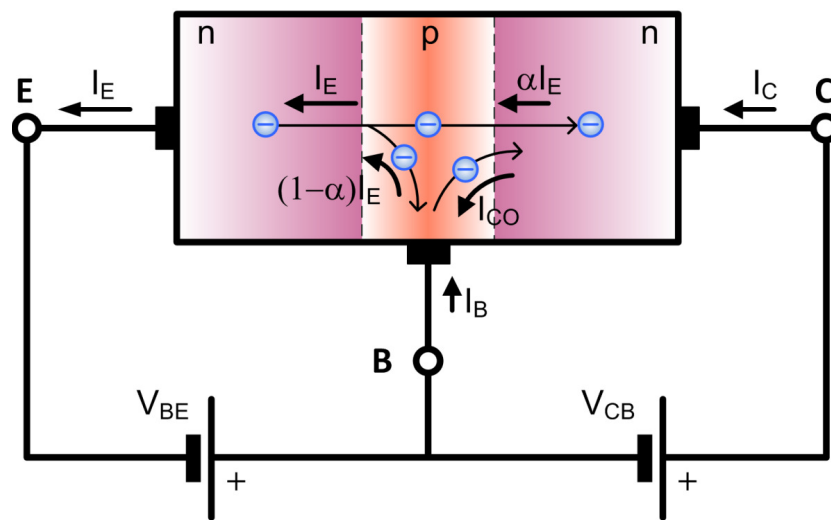


Fig. 3. Corrientes en un transistor n-p-n.

De esta forma entre el emisor y el colector circula una gran corriente, mientras que por la base circula una corriente muy pequeña. El control se produce mediante este terminal de base, ya que si se corta la corriente en la base ya no existe polarización directa de la unión B-E y, por tanto, no circula corriente.

Se produce además una componente de corriente inversa en la unión B-C, denominada I_{CO} (corriente inversa de saturación de la unión B-C con el emisor en circuito abierto) de bajo valor y debida a los portadores minoritarios de las regiones de base y colector.

Por lo tanto, tendremos que la corriente de colector es la suma de la corriente procedente del emisor y de la corriente inversa de saturación de la unión B-C:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CO},$$

donde el parámetro del transistor α se denomina *ganancia de corriente en base común* o h_{FB} , y cuyo valor típico está comprendido entre 0,90 y 0,998 (es decir, la corriente de colector es aproximadamente igual a la de emisor), dependiendo de la temperatura y de los valores de I_E y V_{CB} que determinan el punto de funcionamiento del transistor.

Como $I_E = I_C + I_B$ resulta: $I_C = \alpha(I_C + I_B) + I_{CO}$. Despejando I_C , tenemos:

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CO}.$$

Una forma de medir la eficiencia del BJT es a través de la proporción de electrones capaces de cruzar la base y alcanzar el colector. Se define el parámetro β o h_{FE} , al que se le denomina *ganancia de corriente en emisor común* y que es un parámetro del fabricante, como:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha},$$

y, como puede comprobarse:

$$\frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1.$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CO}.$$

En *zona activa*² normalmente $I_B \gg I_{CO}$, con lo que la expresión anterior puede aproximarse por:

$$I_C \approx \beta \times I_B.$$

Los valores típicos del parámetro β son mucho mayores que la unidad, y están comprendidos entre 10 y 500. Es decir, de acuerdo con la expresión simplificada anterior en activa la corriente de colector es una versión amplificada por β de la corriente de base.

El nombre de transistor es precisamente la contracción de **transfer resistor**, indicando la capacidad del mismo de transferir una corriente desde una baja resistencia (unión B-E polarizada en directa) a una elevada resistencia (unión B-C polarizada en inversa).

² Es una de las tres regiones de funcionamiento del transistor bipolar, como veremos luego. La unión base-emisor se encuentra polarizada en directa y la de colector-base en inversa. En zona activa el transistor funciona como amplificador de señal y, como se ve, la corriente de colector va a depender principalmente de la corriente de base y del parámetro β .

7.2. CARACTERÍSTICAS V-I EN EMISOR COMÚN.

Las curvas características de un transistor relacionan las siguientes variables: corrientes a través de sus terminales y diferencia de potencial entre los mismos. El número de variables es seis, aunque dos se pueden deducir directamente de las otras cuatro.

$$I_E = I_C + I_B \quad V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

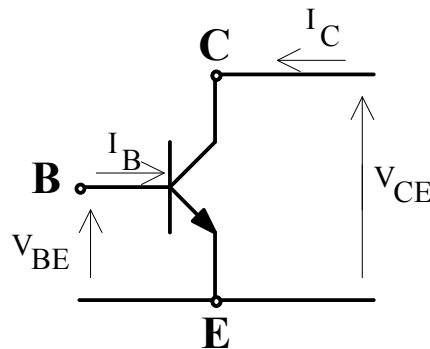


Fig. 4. Corrientes y tensiones en un transistor n-p-n en EC.

Como en un plano se pueden relacionar como máximo tres variables mediante una familia de curvas, resultan necesarias dos familias para relacionar las cuatro variables.

En la configuración **emisor común** (EC), el terminal común a la entrada y salida es el emisor. Entendemos por curvas características de un transistor la representación gráfica de las relaciones entre las tensiones y las corrientes. Las curvas características que se van a estudiar son las curvas características de entrada y las curvas características de salida, que veremos en detalle en los apartados siguientes. En ambos casos son representaciones de tres variables: dos de ellas se representan en los ejes X e Y, y se dibuja una curva para cada valor de la tercera variable.

7.2.1. Curvas características de entrada:

Estas curvas representan $I_B = f(V_{BE})$, con V_{CE} como parámetro.

Las curvas son similares a las del diodo. Al aumentar la polarización inversa de la unión colector-base disminuye la anchura de la base y la corriente de recombinación en la misma (*Efecto Early*).

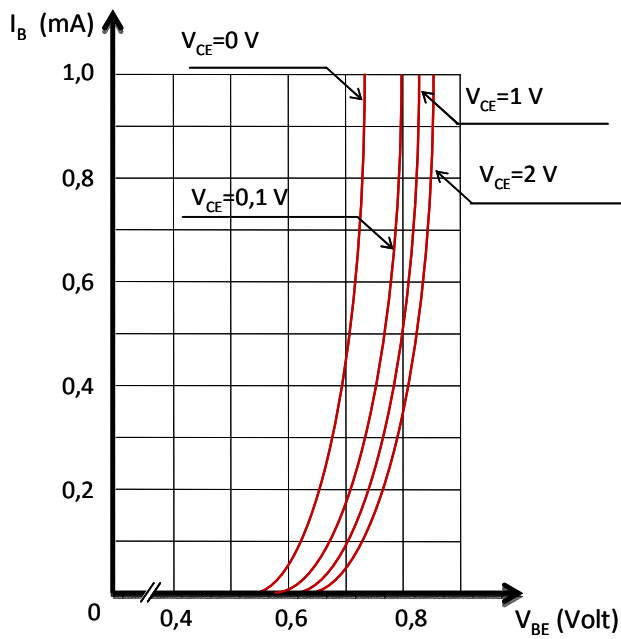


Fig. 5. Características de entrada en emisor común del transistor n-p-n 2N2222A.

7.2.2. Curvas características de salida:

Estas curvas representan $I_C = f(V_{CE})$, con I_B como parámetro.

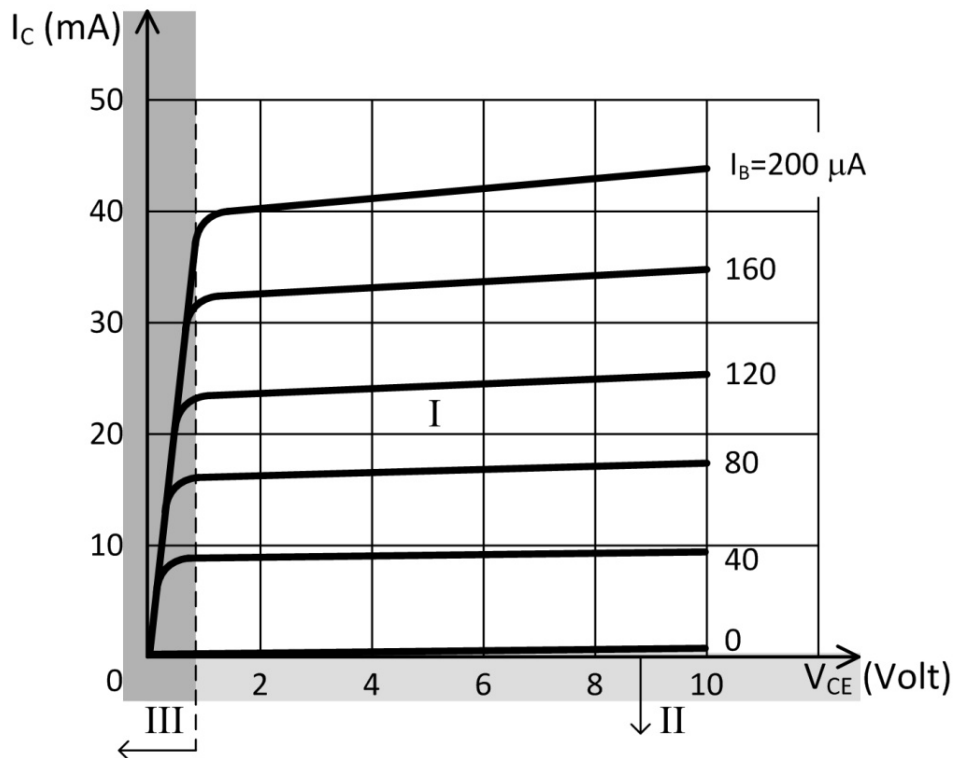


Fig. 6. Características de salida en emisor común del transistor n-p-n de silicio 2N2222A.

A partir de estas curvas es posible determinar el punto de trabajo del transistor bipolar (es decir, las tensiones y las corrientes en el mismo), una vez polarizado.

7.3. REGIONES DE FUNCIONAMIENTO Y MODELOS EQUIVALENTES LINEALES.

Sobre las curvas características de salida se pueden distinguir las tres zonas de funcionamiento del transistor:

I. Región activa. En esta región se cumple:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CO} \approx \beta I_B,$$

$$V_{BE} = V_{BEact} = 0,7 \text{ V, y}$$

$$V_{CE} \geq V_{CEsat} = 0,2 \text{ V.}$$

II. Región de corte. La condición de corte teórico o seguro se alcanza cuando $I_E = 0$, por lo tanto, resulta $I_C = I_{CBO} = -I_B \approx 0$. Esto sucede para una tensión $V_{BE} \leq 0 \text{ V}$ para el silicio. En la práctica se considera corte para $V_{BE} \leq V_{BE\gamma} = 0,5 \text{ V}$.

III. Región de saturación. Las dos uniones se polarizan en directo, y la corriente I_C es independiente de la corriente de base, de forma que:

$$I_{Csat} \leq \beta I_B,$$

$$V_{BE} = V_{BEsat} = 0,8 \text{ V, y}$$

$$V_{CE} = V_{CEsat} = 0,2 \text{ V.}$$

El BJT entra en saturación cuando el colector reduce su tensión por debajo de la de la base, de tal modo que: $V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = V_{BC\gamma} \rightarrow V_{CEsat} = V_{BE} - V_{BC\gamma} = 0,7 - 0,5 = 0,2 \text{ V}$. En esta situación, la corriente de colector es máxima (I_{Csat}), puesto que cualquier incremento de I_B por encima de $I_{Bsat.mínima} = I_{Csat} / \beta$ se reparte en aumentar la inyección de portadores en colector desde la unión B-E y en aumentar la inyección de portadores en emisor desde la unión B-C, corrientes que se contrarrestan porque son opuestas.

| RESUMEN DE VALORES TÍPICOS DE TENSIÓN EN LOS TRANSISTORES BIPOLARES NPN DE SILICIO | | | | | |
|--|-------------|-------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| V_{CEsat} | V_{BEsat} | V_{BEact} | $V_{BEumbral}$ ($V_{BE\gamma}$) | $V_{BEcorte \text{ seguro}}$ | $V_{BEcorte \text{ práctico}}$ |
| 0,2 V | 0,8 V | 0,7 V | 0,5 V | ≤ 0 | $\leq 0,5 \text{ V}$ |

7.3.1. Modelos equivalentes lineales del BJT

Para el análisis de circuitos se sustituye el BJT por modelos o circuitos lineales equivalentes que resultan de linealizar o aproximar por tramos rectos las curvas características.

Los modelos por los que se puede sustituir al transistor *npn* en las diferentes regiones de funcionamiento son:

| REGIÓN | ACTIVA | CORTE | SATURACIÓN |
|--------|--------|-------|------------|
| MODELO | | | |

7.4. EL TRANSISTOR BIPOLAR EN CONMUTACIÓN.

Vamos a hacer un estudio del transistor bipolar *npn* en conmutación en estática basado en un interruptor *npn* con resistencia de colector.

En la figura 7 se observa un interruptor BJT, que consiste en un transistor bipolar *npn*, con parámetros β , $V_{BE\gamma}$, V_{BEact} , V_{BEsat} , y V_{CEsat} conocidos, conectado en emisor común (EC), con una resistencia R_C de colector de elevación (*pull-up*), alimentado a $V_{CC} > V_{BE\gamma}$. La tensión de entrada V_i se aplica a la base (B) del transistor a través de una resistencia R_B de limitación de corriente, y la tensión de salida V_o se toma del colector (C) del transistor, y coincide con V_{CE} ($V_{CE} = V_o$). Si suponemos que se aplica a la entrada una señal de dos niveles $V_{iL} \leq V_{BE\gamma}$ y $V_{iH} = V_{CC}$, el problema es determinar la tensión V_o de salida en cada caso.

7.4.1. Análisis gráfico.

Si la tensión de entrada V_i es menor a la tensión umbral $V_{BE\gamma}$, el transistor Q está al corte (apagado: OFF), y el punto de funcionamiento se sitúa en el punto A sobre las curvas características de salida (fig. 8) en la región de corte, con $I_{BQ} = I_{CQ} = 0$, $V_{BEQ} = V_i$, y $V_{CEQ} = V_{CC}$, y la tensión de salida es alta, es decir, $V_o = V_{CEQ} = V_{CC}$.

Cuando la tensión de entrada V_i está por encima del umbral $V_{BE\gamma}$, el punto de trabajo se desplaza hacia arriba a lo largo de la recta de carga³. Para $V_i = V_{CC}$, el

³ La recta de carga se obtiene a partir de la ecuación de la malla de salida o de colector del transistor bipolar, como veremos luego.

transistor Q está en conducción (encendido: ON), en el punto B de la región de saturación, y la tensión de salida es baja, $V_o = V_{CEsat} \approx 0$. En algunos casos, dependiendo de los parámetros del circuito, Q puede situarse en la región activa.

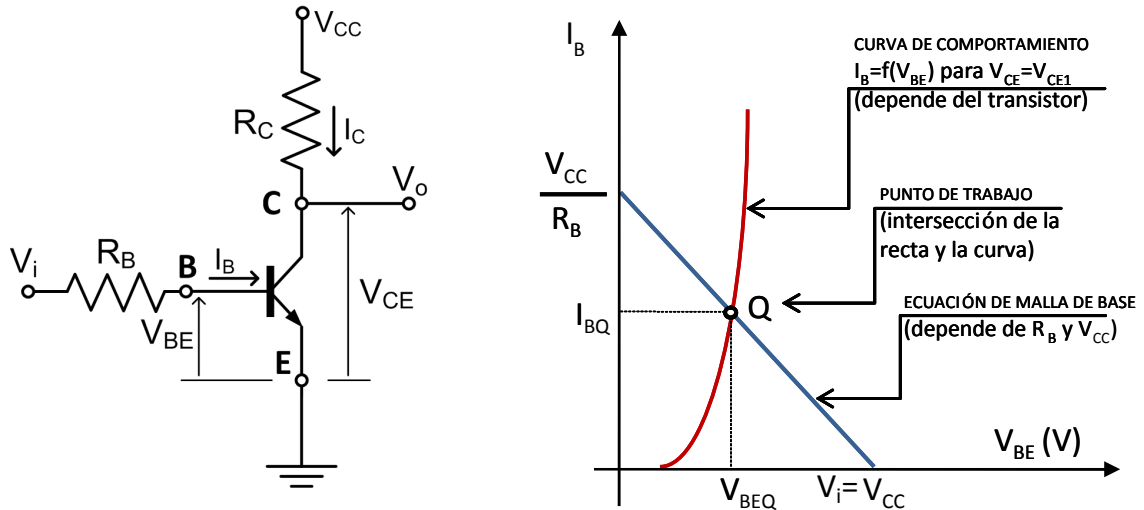


Fig. 7. Interruptor con transistor n-p-n. Análisis gráfico.

La ecuación de malla del circuito de base es:

$$V_i = V_{CC} = I_B R_B + V_{BE}.$$

Si la representamos sobre la característica de entrada (Fig. 7), de la intersección con la característica del transistor obtenemos el valor de la corriente de base I_{BQ} .

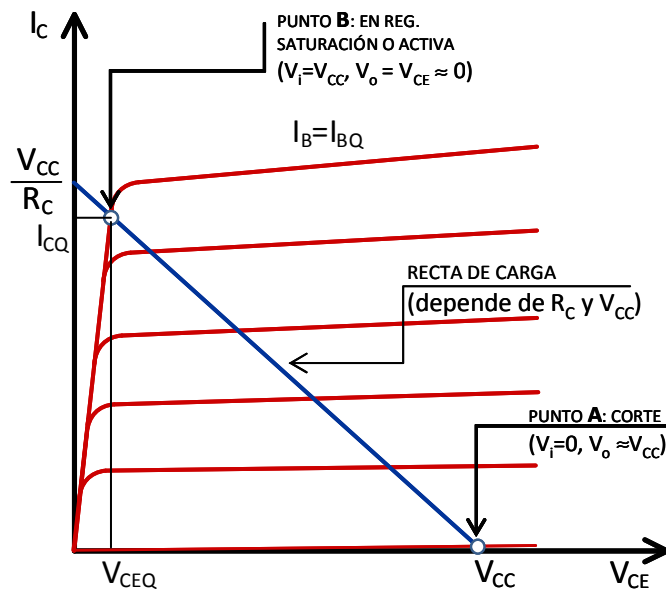


Fig. 8. Análisis gráfico. Puntos de trabajo del transistor n-p-n en conmutación.

La ecuación de la malla del circuito de colector es:

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

que se conoce como **recta de carga**.

Representada sobre las características de salida (Fig. 8), el punto de intersección con la curva $I_B = I_{BQ}$, determina los valores del punto B de funcionamiento I_{CQ} y V_{CEQ} .

7.4.2. Método Analítico.

Con el método analítico vamos a determinar la región de funcionamiento, y sustuiremos el dispositivo por el modelo lineal correspondiente.

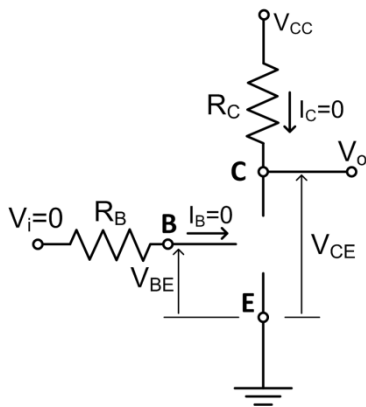


Fig. 9. Transistor n-p-n en corte.

- Si $V_i = V_{iL} \Rightarrow V_{BE} \leq V_{BE\gamma} \Rightarrow$ **Q Corte (OFF)**.

Como $I_C = 0 \Rightarrow V_o = V_{CC}$ (fig. 9)

- Si $V_i = V_{iH} = V_{CC} \Rightarrow V_{BE} > V_{BE\gamma} \Rightarrow$ **Q Conducción (ON)**.

Pueden producirse dos casos:

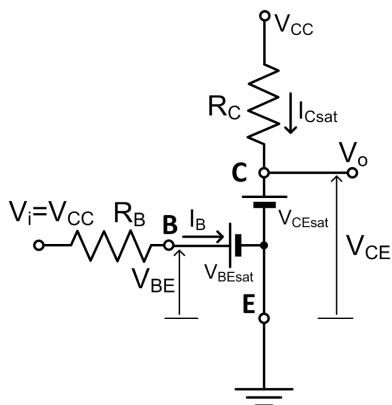


Fig. 10. Transistor n-p-n en saturación.

✓ Suponiendo el BJT en **saturación** :

$$V_o = V_{CEQ} = V_{CEsat.}, V_{BEQ} = V_{BEsat.},$$

$$I_{BQsat} = \frac{V_{CC} - V_{BEsat.}}{R_B},$$

$$I_{CQ} = I_{Csat.} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat.}}{R_C} \leq \beta I_{Bsat} \Rightarrow Q \text{ en saturación.}$$

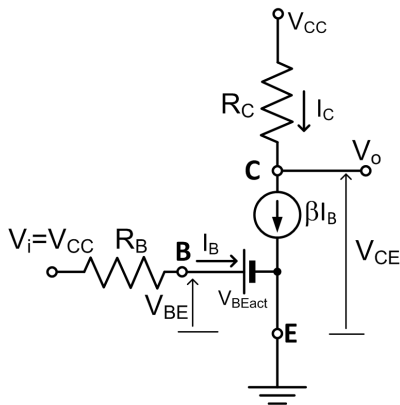


Fig. 11. Transistor n-p-n en activa.

✓ Suponiendo el BJT en **activa** :

$$V_{BEQ} = V_{BEact.},$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEact.}}{R_B}, I_{CQ} = \beta I_{BQ},$$

$$V_o = V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C \geq V_{CEsat} \Rightarrow Q \text{ en activa.}$$

Límite entre las regiones de corte y de conducción:

Cuando V_i alcanza el valor $V_{BE\gamma}$, el transistor se sitúa en el límite entre corte y conducción. Dado que $V_{CE} = V_{CC} > V_{CEsat.}$, el BJT se encuentra entre corte y activa.

Para tensiones V_{BE} comprendidas entre $V_{BE\gamma} = 0,5V$ y $V_{BEact} = 0,7V$ el transistor se encuentra en conducción en activa, pero con corrientes cero. Realmente hay unas pequeñas corrientes que en la mayor parte de los casos son despreciables.

Límite entre activa y saturación:

Al ir aumentando la tensión V_i la tensión de salida $V_o = V_{CE}$ va disminuyendo, y Q acaba alcanzando la saturación. Habrá entonces un valor de V_i para el cual el transistor se encuentra simultáneamente en las dos zonas. En este punto se cumplen las

siguientes expresiones:

$$\left. \begin{array}{l} V_{BE} = V_{BEsat.} \\ I_C = \beta I_B \\ V_{CE} = V_{CEsat.} \end{array} \right\}$$