

**SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE  
SENA**

**CENTRO DE TECNOLOGIA DE LA MANUFACTURA AVANZADA**



**MATERIAL DE APOYO**

**TIPOS DE POLARIZACIÓN DE UN TRANSISTOR**

## MATERIAL DE APOYO 5.3

Los Resultados del aprendizaje de este tema serán los siguientes:

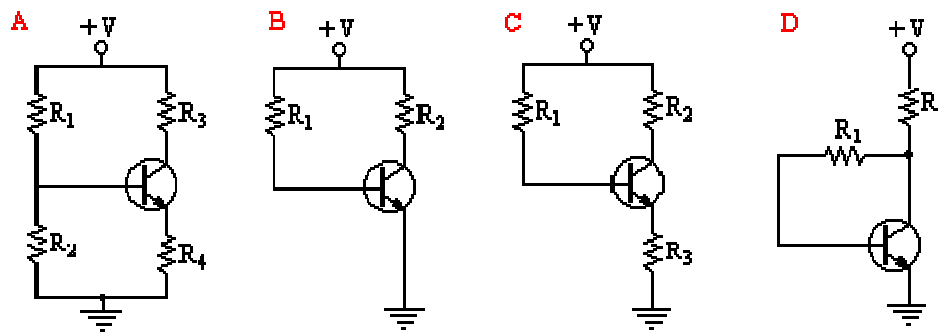
- Identificar los tipos de polarización de un transistor
- Entender el funcionamiento de un transistor en conmutación (como suiche)
- Comprender el funcionamiento de un transistor como amplificador
- Identificar las diferentes clase de amplificación de un transistor

### TIPOS DE POLARIZACIÓN DE UN TRANSISTOR

Existen también otros tipos de polarización que iremos analizando, empezando por el peor circuito y terminando con el mejor. Los circuitos que ahora veremos son estos:

- Circuito de polarización de base.
- Circuito de polarización con realimentación de emisor.
- Circuito de polarización con realimentación de colector.
- Circuito de polarización por divisor de tensión.
- Circuito de polarización de emisor con 2 fuentes de alimentación.
- Circuito de polarización con realimentación de emisor y realimentación de colector

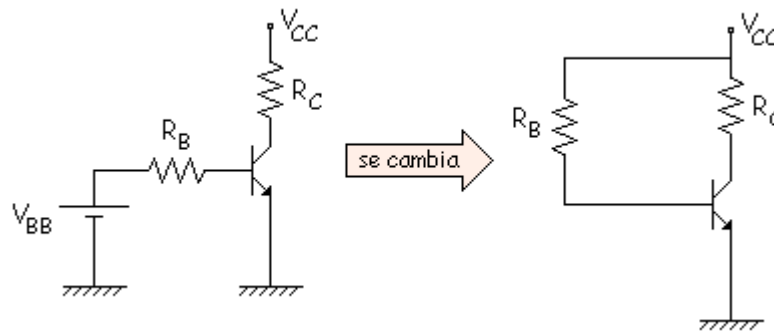
En la figura podemos ver varias de las configuraciones para polarizar al transistor:



### Circuito de polarización de base

En este tema habíamos dicho que tomaríamos todos los circuitos en activa, para que más adelante al meter la alterna podamos amplificar.

El circuito en cuestión es el siguiente:



mallá de entrada:

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{CE} = 0 \Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_B} \approx \text{cte} \quad \text{Muy Estable}$$

$I_B$  es muy ESTABLE.  $V_{BE}$  varía con la  $T^a$ , disminuye 2 mV por cada grado centígrado ( $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ), pero como no disminuye mucho que se supone  $I_B = \text{CTE}$ .

Y la  $I_C$  sería:

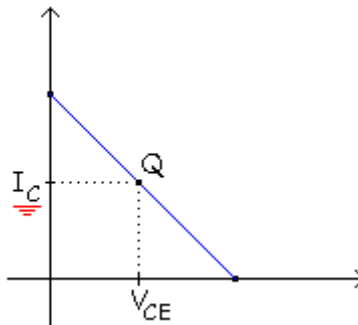
$$I_C = \beta_{CC} \cdot I_B = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_B} \cdot \beta_{CC} \quad \text{Muy Inestable}$$

$I_C$  es muy INESTABLE porque la  $\beta_{CC}$  varía mucho con la temperatura. Por lo tanto tenemos:

- $I_B$  MUY ESTABLE
- $I_C$  MUY INESTABLE

¿Cual me interesa que sea muy estable?

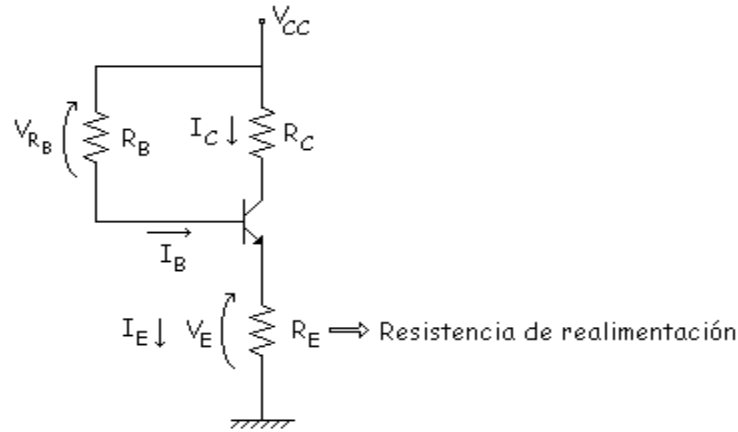
Interesa que **Q** esté centrado y que no se mueva con la  $T^a$ .



Como Q depende de  $I_C$ , el circuito anterior es muy malo porque el punto Q es INESTABLE

### **Circuito de polarización con realimentación de emisor**

En este circuito la resistencia de realimentación es  $R_E$ .



Haremos la prueba de desestabilizar el punto Q.

$$T^a \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow \begin{matrix} I_E \uparrow \uparrow \\ I_C \uparrow \uparrow \end{matrix}$$

$I_C$  intenta aumentar mucho. Pero al aumentar la  $I_C$ , aumenta la  $V_E$ .

$$T^a \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow \begin{matrix} I_E \uparrow \uparrow \\ I_C \uparrow \uparrow \end{matrix} \Rightarrow V_E \uparrow \Rightarrow V_{R_B} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow \underline{I_C \downarrow}$$

Entonces vemos que se da un fenómeno de "autorregulación", intenta aumentar mucho pero al final aumenta menos. Aunque no se estabiliza, se desestabiliza menos, esa "auto corrección" se llama realimentación.

$$\beta \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow I_B \downarrow$$

variable	variable
de	de
salida	entrada

A este efecto de que una variable de salida afecte a la entrada se le llama realimentación, la salida afecta a la entrada, se auto corrige. Además se le llama "Realimentación negativa" porque un aumento supone una disminución. Si un aumento supusiera otro aumento sería una "Realimentación positiva".

En amplificadores es muy importante la realimentación, como se verá más adelante. Seguimos analizando el circuito. Malla de entrada:

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot (I_B + I_C) = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta} + R_E \cdot \frac{1 + \beta}{\beta}}$$

**EJEMPLO:** Para ver como se mueve el punto Q.

$$V_{CC} = +15 \text{ V} \quad R_C = 910 \ \Omega \quad R_B = 430 \ \Omega \quad R_E = 100 \ \Omega \quad V_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C$$

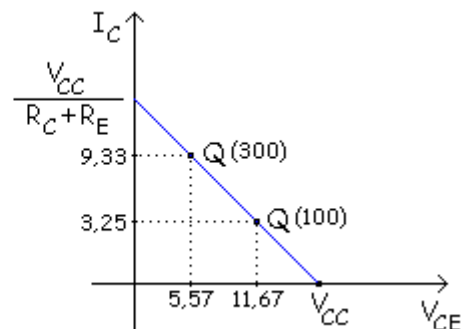
$$\beta = 100 \Rightarrow I_C = 3,25 \text{ mA} \Rightarrow V_{CE} = 11,67 \text{ V}$$

$$\beta = 300 \Rightarrow I_C = 9,33 \text{ mA} \Rightarrow V_{CE} = 5,57 \text{ V}$$

Recta de carga:

$$-V_{CC} + (R_C + R_E) \cdot I_C + V_{CE} = 0$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} \cdot V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$



Se ha movido mucho pero menos que el anterior.

$$\Delta I_C = 9,33 - 3,25 = 6,08 \text{ mA}$$

Cuanto menor sea este resultado, mejor será el circuito, esto sirve para comparar circuitos. Para mejorar el circuito se puede hacer:

$$\frac{R_B}{\beta} \ll R_E$$

Se suele coger 100 veces mayor  $R_E$ .

$$R_E = 100 \cdot \frac{R_B}{\beta}$$

Veamos si se cumple en este circuito.

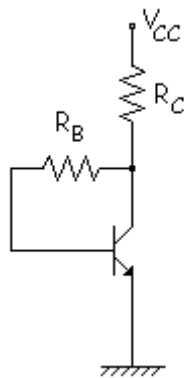
$$\frac{R_B}{\beta} = 4,3$$

$$R_E = 0,1$$

No se cumple.  $R_E$  debería ser  $R_E = 430 \text{ k}\Omega$ . Pero poner  $R_E = 430 \text{ k}\Omega$  hace que casi toda la tensión de  $V_{CC}$  vaya a  $R_E$  y la  $V_{CE}$  es pequeña, y el circuito entra en saturación y no funciona como amplificador, el remedio es peor.

### Circuito de polarización con realimentación de colector

El circuito es el siguiente:



Veamos como se comporta la  $T^a$ .

$$T^a \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow \underline{I_C \uparrow \uparrow} \Rightarrow V_C \uparrow \Rightarrow V_{R_B} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow \underline{I_C \downarrow}$$

Y la  $I_C$  aumenta menos de lo que pretendía, realimentación negativa, se ha compensado en parte.

Malla de entrada:

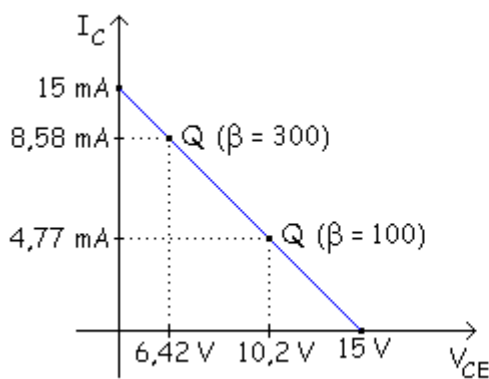
$$-V_{CC} + R_C \cdot (I_B + I_C) + R_B \cdot I_B + V_{BE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta} + R_C \cdot \frac{1 + \beta}{\beta}}$$

↑  
El problemático

Hacemos como antes:

$$\begin{aligned} \beta = 100 &\Rightarrow I_C = 4,77 \text{ mA} \Rightarrow V_{CE} = 10,23 \text{ V} \\ \beta = 300 &\Rightarrow I_C = 8,58 \text{ mA} \Rightarrow V_{CE} = 6,42 \text{ V} \end{aligned}$$

Recta de carga. Malla de salida:



$$-V_{CC} + R_C \cdot (I_B + I_C) + V_{BE} = 0$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} \cdot V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} \begin{cases} V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15}{1} = 15 \text{ mA} \\ I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 15 \text{ V} \end{cases}$$

La Inestabilidad  $\Delta I_C$  o  $\Delta V_{CE}$ , se suele calcular  $\Delta V_{CE}$

Lo que se mueve:  $\Delta I_C = 8,58 - 4,77 = 3,81 \text{ mA}$

Si los comparamos:

- Circuito de polarización por realimentación de emisor: = 6....mA
- Circuito de polarización por realimentación de colector: = 3.81 mA

Este último es mejor por ahora. De antes teníamos:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta} + R_C}$$

Para que se mueva lo menos posible, el  $\beta$  tiene que afectar lo menos posible, interesa que  $R_C$  influya más que  $R_B/\beta$ , para eso:



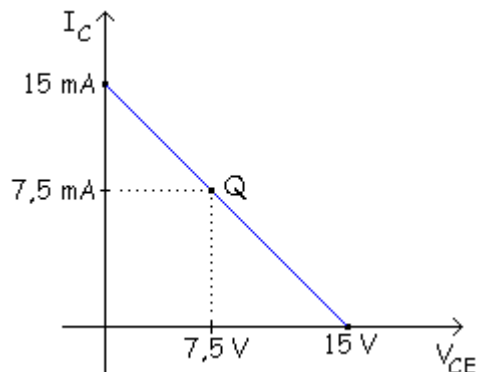
$$\frac{R_B}{\beta} \ll R_C \quad \text{Por ejemplo: } R_C = 100 \cdot \frac{R_B}{\beta}$$

$$\text{Interesa } \begin{cases} R_B \text{ pequeña} \\ R_C \text{ grande} \end{cases}$$

$R_C$  normalmente no se suele poder elegir, no se puede elegir normalmente. Entonces la  $R_B$  se elegirá la menor posible.

Hay que recordar que en el circuito anterior de realimentación de emisor si cogíamos  $R_B$  muy pequeña se saturaba. En este circuito, a medida que disminuía  $R_B$  se iba acercando a saturación, no se saturaba pero se acercaba mucho. Por eso no es útil, porque se acerca mucho a saturación (aunque nunca llegue a los  $V_{CE} = 0.2 \text{ V}$  de saturación).

¿Que debería hacer para que Q estuviera centrado? Para que esto ocurra:



$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{\frac{R_B}{\beta} + R_C} = \frac{V_{CC}}{2R_C}$$

50% ↗      ↘ 50%

Haremos que influyan lo mismo

$$R_C = \frac{V_{CC}}{2I_C} \quad \text{Q CENTRADO}$$

$$R_C = 100 \cdot \frac{R_B}{\beta} \quad \text{Q ESTABLE}$$

No se pueden cumplir los dos, si está centrado no es estable y viceversa.

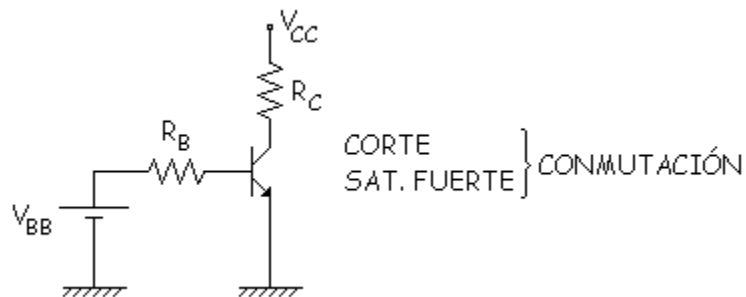
Y este circuito no es bueno por esa razón, aunque sea mejor que los anteriores, es todavía bastante inestable.

## Circuito de polarización por divisor de tensión

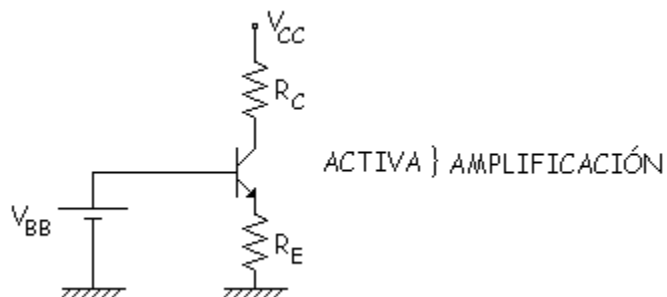
Este tema es una continuación del anterior, por ello primeramente vamos a hacer un breve resumen de lo visto anteriormente para situarnos mejor en el tema.

Hasta ahora hemos visto estos circuitos:

- Circuito de polarización de base (resistencia en la base).

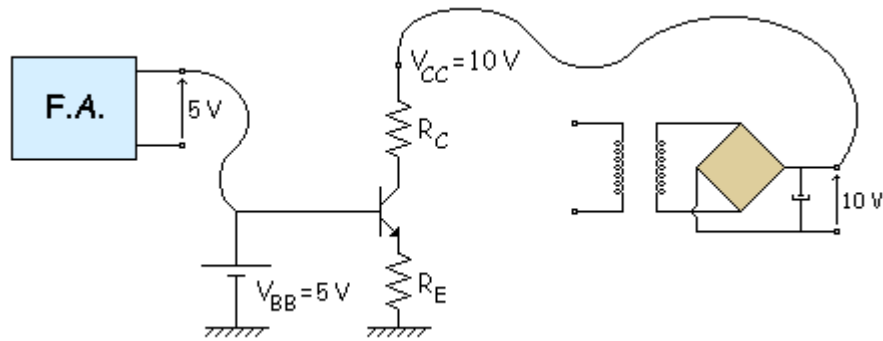


- Circuito de polarización de emisor (resistencia en emisor).



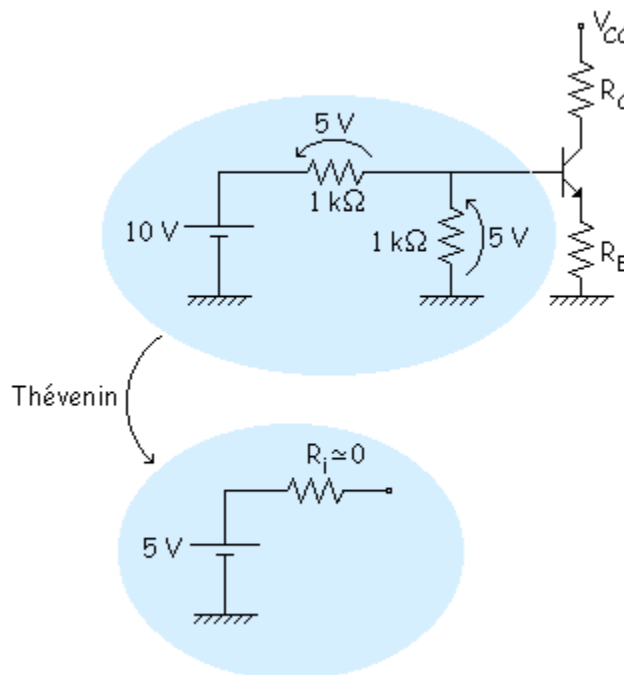
En este tema analizaremos este último circuito más que ningún otro.

Las pilas normalmente suelen ser fuentes de alimentación.

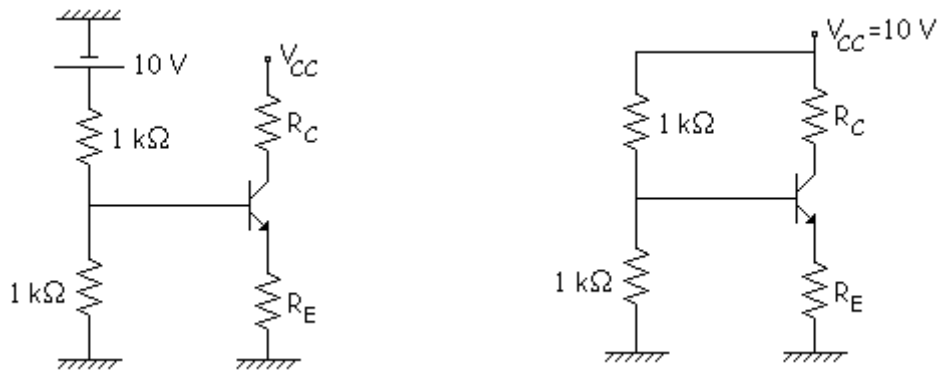


Pero es muy caro poner 2 fuentes de alimentación por eso se suele modificarse el circuito de tal forma que solo se usa una fuente de alimentación.

Como se ha dicho ahora nos ahorraremos una fuente de alimentación.

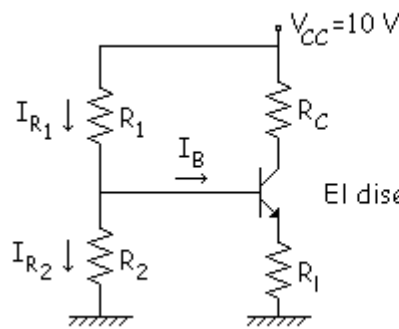


Ahora se mueve lo de la izquierda hacia arriba y como tenemos 10 V en los dos lados se pueden unir:



Y así nos hemos ahorrado una fuente de alimentación, este es el "Circuito de polarización por división de tensión".

**Análisis aproximado**

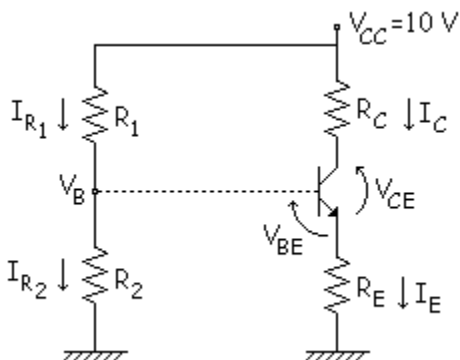


$$I_B \ll \frac{I_{R1}}{I_{R2}} \rightarrow I_{R1} \approx I_{R2}$$

El diseño sale relativamente bien si se cumple:

$$I_B \leq \frac{I_{R1}}{20} \text{ (o } \frac{I_{R2}}{20} \text{)}$$

Así despreciamos  $I_B$ :



$$I_{R1} \approx I_{R2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$V_B = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

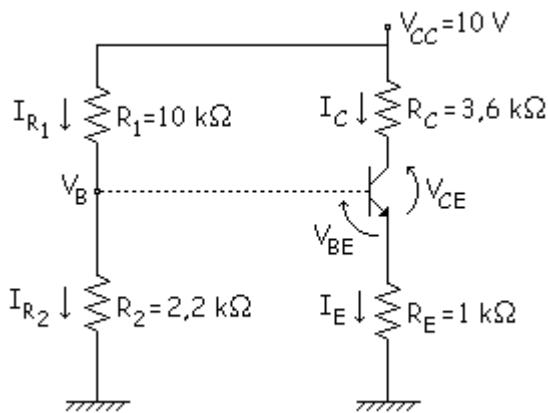
$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$I_C \approx I_E$$

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + I_E \cdot R_E + V_{CE} = 0 \rightarrow V_{CE} = \dots$$

**EJEMPLO:** Aplicamos valores numéricos a lo que hemos hecho.



$$I_{R_1} \approx I_{R_2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{10}{10 + 2,2} = 0,8 \text{ mA}$$

$$V_B = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{10}{10 + 2,2} \cdot 2,2 = 1,8 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{1,1 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,1 \text{ mA}$$

$$I_C \approx I_E = 1,1 \text{ mA}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 1,8 - 0,7 = 1,1 \text{ V}$$

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + I_E \cdot R_E + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = 10 - 3,6 \cdot 1,1 - 1,1 \cdot 1 = 4,94 \text{ V}$$

Vemos si la aproximación es buena: se tiene que cumplir:

$$I_B \leq \frac{I_{R_1}}{20} \text{ (o } \frac{I_{R_2}}{20})$$

Tiene que funcionar bien para los tres valores del catálogo.

### CATÁLOGO:

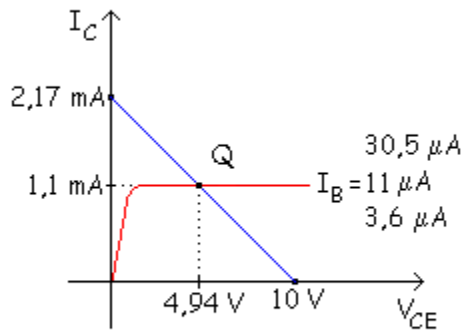
	mín	tipico	máx
$\beta$	36	100	300

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1,1 \text{ mA}}{36} = 30,2 \mu\text{A}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1,1 \text{ mA}}{100} = 11 \mu\text{A}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1,1 \text{ mA}}{300} = 3,6 \mu\text{A}$$

Para comprobarlo vamos a ver la recta de carga de continua (la de alterna se verá más adelante).



$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + I_E \cdot R_E + V_{CE} = 0$$

$$-V_{CC} + I_C \cdot (R_C + R_E) + V_{CE} = 0$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} \cdot V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$y = m \cdot x + b$  es una recta

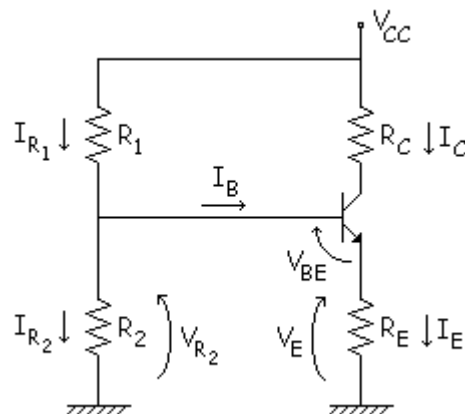
$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{10}{3,6 + 1} = 2,17 \text{ mA}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 10 \text{ V}$$

¿Qué curva de  $I_B$  pasa por ese punto Q?

Si cambiamos el transistor, Q es el mismo pero varía la  $I_B$ . No cambia la recta de carga ni el punto Q, lo que cambia es la  $I_B$ , se "Auto adapta". El punto Q es muy estable, prácticamente no cambia de sitio, para hacer los cálculos no hemos usado la  $\beta$ , solo para la  $I_B$ .

En todo circuito que quiera que se auto compense tiene que haber una resistencia de realimentación, en este caso es  $R_E$ , que hace que sea estable el punto Q.



Veamos como se comporta si variamos la temperatura o cambiamos de transistor (C.T.).

$$\left. \begin{array}{l} T^{\alpha} \uparrow \\ \text{C.T.} \end{array} \right\} \Rightarrow \beta \uparrow \Rightarrow \left. \begin{array}{l} I_E \uparrow \uparrow \\ I_C \uparrow \uparrow \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} V_E \uparrow \\ V_{R_2} \approx \text{cte} \end{array} \right\} \Rightarrow V_{BE} \downarrow \Rightarrow I_B \downarrow \Rightarrow \underline{I_C \downarrow}$$

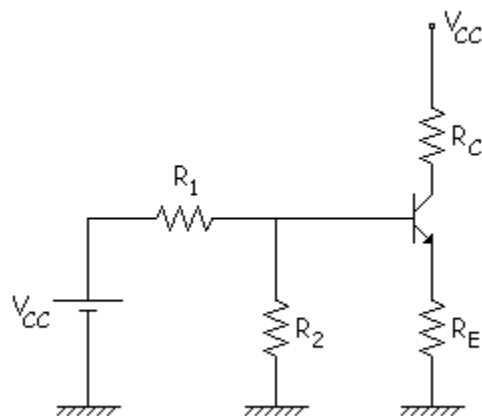
C.T. = Cambio de Transistor

Y se compensa en parte la  $I_C$ , se mueve pero menos. Es un circuito muy bueno, la compensación no es total pero casi, es una compensación muy buena. Este circuito es el que se utiliza mayoritariamente por ser bueno, barato y efectivo.

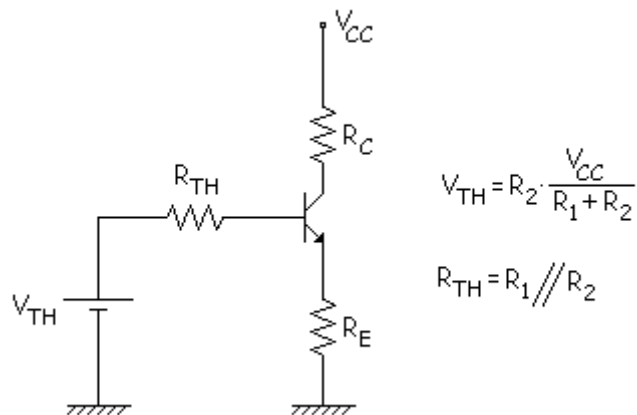
Lo analizaremos como siempre de 2 formas: Análisis aproximado y exacto.

### ⊕ Aproximado (ideal).

Primeramente modificaremos un poco el circuito:



Ahora aplicaremos Thévenin:



Aproximamos:  $R_{TH} = 0$ . Malla de entrada:

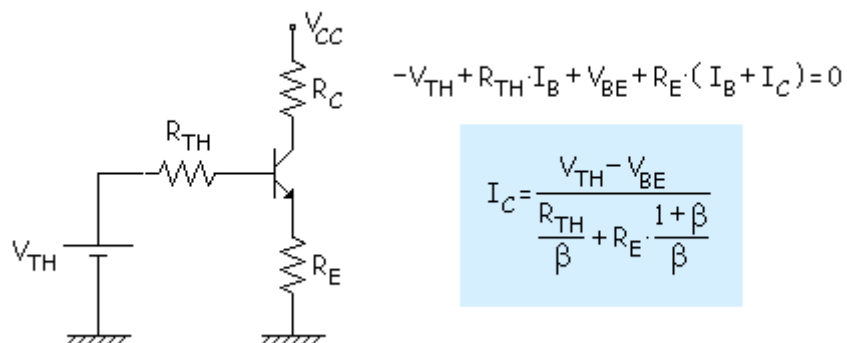
$$-V_{TH} + V_{BE} + R_E \cdot I_E = 0$$

$$I_C \approx I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E} \approx \text{cte}$$

El punto Q es estable. Tenemos lo ideal, no está la  $\beta$ . Lo único que varía algo es la  $V_{BE}$ , pero es una variación pequeña respecto a  $V_{TH}$ , entonces es casi constante la  $I_C$ .

### ⊕ Exacto

Aprovechamos lo calculado anteriormente:

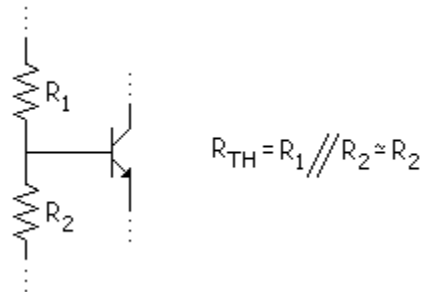


Interesa que  $R_{TH}/\beta$  influya poco respecto a  $R_E$ . Hacemos  $R_E$  100 veces mayor que  $R_{TH}/\beta$ .



$$R_E = 100 \cdot \frac{R_B}{\beta} \Rightarrow R_{TH} \leq 0,01 \cdot R_E \cdot \beta \quad Q \text{ ESTABLE}$$

Pero es difícil que se cumpla esto porque  $R_{TH}$  es el paralelo de  $R_1$  y  $R_2$ , y de estas dos resistencias la más pequeña suele ser  $R_2$ , entonces si aproximamos para verlo mejor:

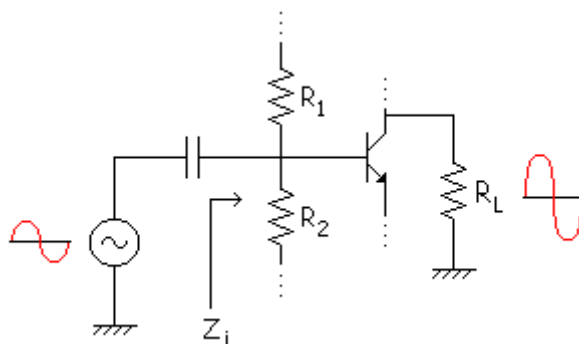


Para que esto funcione correctamente hemos dicho que se tiene que cumplir lo siguiente:

$$R_{TH} \leq 0,01 \cdot R_E \cdot \beta \Rightarrow R_2 \leq 0,01 \cdot R_E \cdot \beta$$

Pero si pongo  $R_2$  muy pequeño, la  $I_{R_2}$  es grande y es aproximadamente  $I_{R_1}$  y esa intensidad va a la F.A., entonces el condensador y los diodos de la F.A. tienen que resistir mucha intensidad y podría dar problemas.

Otro problema se da en alterna:



Cuando amplificamos la onda es muy importante la impedancia de entrada ( $Z_i$ ) y tiene que ser de un valor concreto. Su valor es:

$$Z_i = R_1 // R_2 // \dots$$

No se puede hacer la  $Z_i$  todo lo pequeña que se quiera y eso es una pega, se estropea la  $Z_i$  en alterna. Hay 2 pegas:

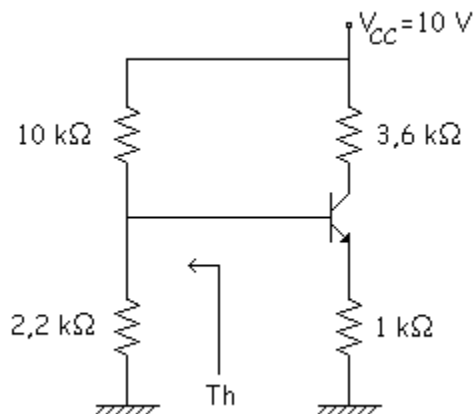
- El consumo
- La  $Z_i$

Para resolver eso los diseñadores cogen en vez de  $0,01R_B \cdot \beta$  suelen coger un poco mayor,  $0,1R_E \cdot \beta$ .

$$R_2 \leq 0,1 \cdot R_E \cdot \beta$$

Y así Q es **bastante estable**, aunque no sea tan estable como antes.

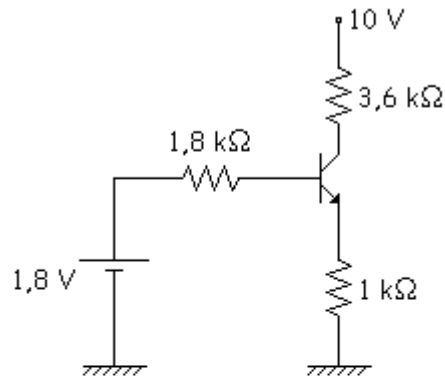
### EJEMPLO:



Como siempre aplicamos Thévenin y calculamos  $I_B$  e  $I_C$  para los distintos valores de  $\beta$ .

$$V_{TH} = 2,2 \cdot \frac{10}{10 + 2,2} = 1,8 \text{ V}$$

$$R_{TH} = 10 \parallel 2,2 = 1,8 \text{ k}\Omega$$



$$-1,8 + 1,8 \cdot I_B + 0,7 + 1 \cdot (I_B + I_C) = 0$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

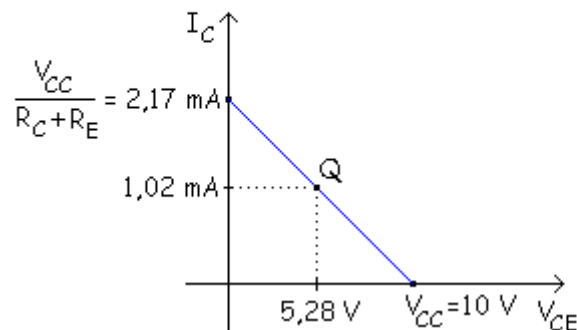
$I_B = 28,35 \mu\text{A} \rightarrow \beta = 36$
$10,7 \mu\text{A} \rightarrow \beta = 100$
$3,633 \mu\text{A} \rightarrow \beta = 300$
$I_C = 1,02 \text{ mA} \rightarrow \beta = 36$
$1,07 \text{ mA} \rightarrow \beta = 100$
$1,0898 \text{ mA} \rightarrow \beta = 300$

Ahora calculamos el  $V_{CE}$  y dibujamos la gráfica:

$$-10 + 3,6 \cdot 1,02 + V_{CE} + 1 \cdot (0,02835 + 1,02) = 0 \Rightarrow V_{CE} = 5,28 \text{ V}$$

$$5,0673 \text{ V}$$

$$4,983 \text{ V}$$



Vemos que el punto Q varía muy poco para distintos valores de  $\beta$ . Esto lo vemos con la variación de  $I_C$ .

$$\Delta I_C = 1,0898 - 1,02 = 0,0698 \text{ mA}$$

Para ver la estabilidad del circuito estudiaremos el caso más crítico, que es el valor más pequeño de  $\beta$ , si se cumple para este valor se cumple en todos los demás casos, porque es el peor caso.

$$R_2 \leq 0,01 \cdot R_E \cdot \beta$$

$$2,2 \leq 0,01 \cdot 1 \cdot 36 \quad \text{mínimo}$$

100 típico

300 máximo

$$2,2 \leq 0,36$$

No se cumple el muy estable, veamos ahora el "Bastante Estable".

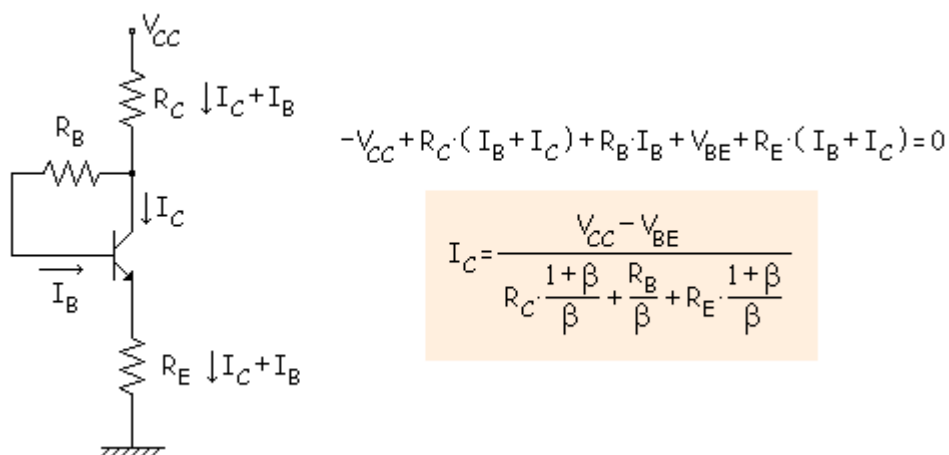
$$R_2 \leq 0,1 \cdot R_E \cdot \beta$$

$$2,2 \leq 3,6$$

Es bastante estable porque se cumple la ecuación, esto quiere decir que esta bastante bien diseñado el circuito.

### Circuito de polarización con realimentación de emisor y realimentación de colector

Con este circuito se intenta obtener polarizaciones más estables para los circuitos con transistores. Para ello se usa una combinación de una resistencia de emisor y una resistencia de colector.

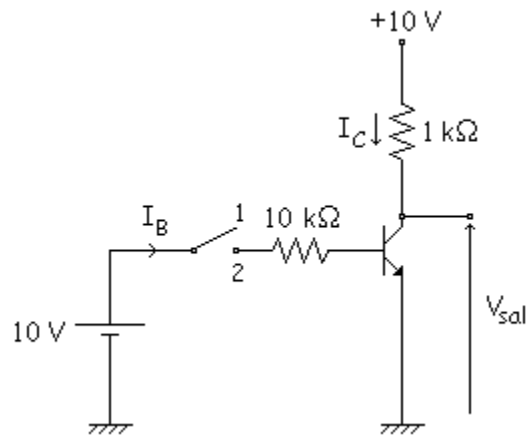


Para que sea estable se tiene que cumplir:

$$R_C + R_E \geq 100 \cdot \frac{R_B}{\beta}$$

Pero el problema es que si  $R_C$  y  $R_E$  son muy grandes el valor de  $V_{CE}$  tiene que ser pequeño y puede llegar a saturación, por eso no se puede hacer todo lo grande que se quiera.

## EL TRANSISTOR EN CONMUTACIÓN

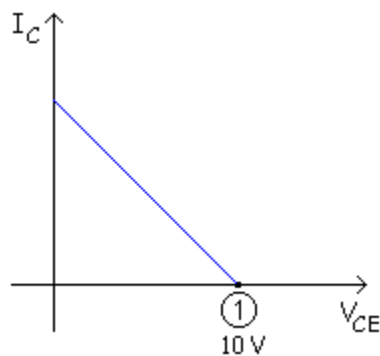


Tenemos un interruptor en posición 1, abierto:

$$I_B = 0$$

$I_C = 0$  CORTE (el transistor no conduce)

Recta de carga:

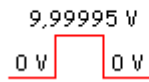


Esto era lo ideal, lo exacto sería:

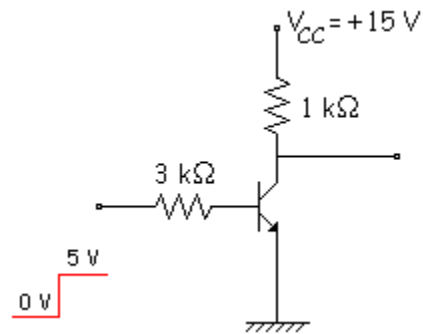
$$\textcircled{1} I_B = 0$$

$$I_C = I_{CE0} = 50 \text{ nA}$$

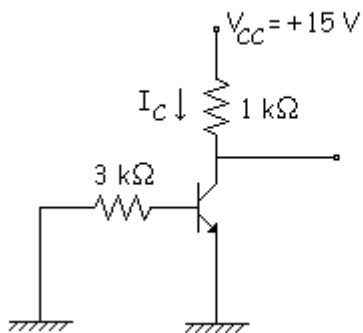
$$-10 + 1 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-9} + V_{CE} = 0 \Rightarrow V_{CE} = 9,99995 \text{ V}$$



Analizaremos uno de los circuitos típicos que se usan en electrónica digital.



$\textcircled{1}$  0 V a la entrada

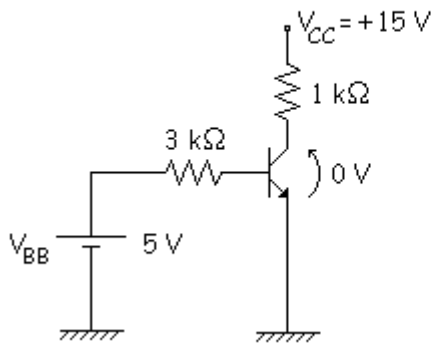


$$I_B = 0$$

$$I_C = 0 \text{ CORTE}$$

$$V_O = 15 \text{ V}$$

② 5 V a la entrada



IDEAL  $V_{BE_{sat}} = 0$

$V_{CE_{sat}} = 0$

Hipótesis: SATURACIÓN

$$I_B = \frac{5 - 0,7}{10} = 1,43 \text{ mA}$$

$$I_C = \frac{15 - 0}{1} = 15 \text{ mA}$$

Vamos a ver si la hipótesis es correcta:

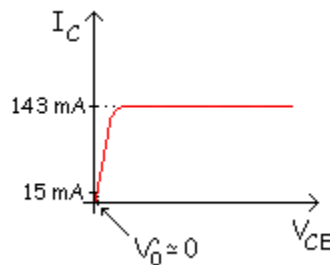
$$I_C < \beta \cdot I_B$$

$$15 \text{ mA} < 143 \text{ mA}$$

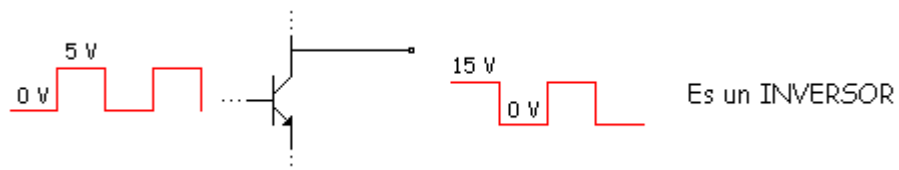
La hipótesis es correcta, estamos en saturación. Ahora comprobaremos si es saturación normal o fuerte:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{15}{1,43} = 10,48 \text{ SATURACIÓN FUERTE} \quad \frac{I_C}{I_B} \leq 10$$

Y la salida se aproxima a cero:  $V_0 = 0 \text{ V}$ .



Veamos que ocurre si a la entrada le metemos por ejemplo una onda cuadrada:



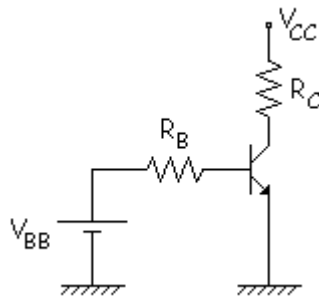
Así el circuito se comporta como un INVERSOR. Para que a la salida en lugar de 0 V y 15 V tengamos 0 V y 5 V, se cambia la pila  $V_{CC}$  de + 15 V a  $V_{CC} = + 5$  V.



## EL TRANSISTOR COMO FUENTE DE CORRIENTE

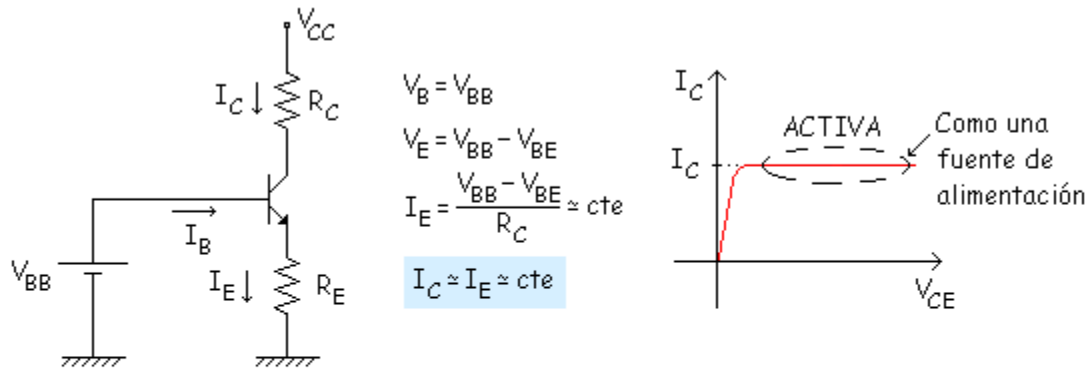
Para estudiar este apartado compararemos 2 circuitos, el que hemos visto anteriormente y uno nuevo:

- ① **Circuito de polarización de base** (conmutación con CORTE y SATURACIÓN FUERTE).



- ② **Circuito de polarización de emisor** (en ACTIVA). La resistencia de la base se coloca en el emisor, lo demás igual.





$$\left. \begin{array}{l} I_B = \frac{I_C}{\beta} \\ \beta \neq \text{cte} \end{array} \right\} \Rightarrow I_B \neq \text{cte}$$

$$\text{ACTIVA} \left\{ \begin{array}{l} I_E = \text{cte} \\ I_B \neq \text{cte} \end{array} \right.$$

① En el primer circuito tenemos:

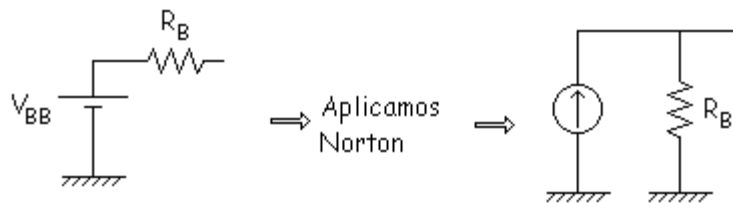
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \approx \text{cte}$$

$$I_C = I_E \neq \text{cte}$$

Veamos como está atacada la base en los dos circuitos

② Se ataca a la base con una fuente de tensión constante ( $V_{BB}$ ).

- ① La base está atacada por una fuente de tensión constante y una resistencia.



Es casi una fuente de corriente. Se ataca a la base con una fuente de corriente

- ② La  $R_C$  no interviene en la fuente de corriente no importa el valor de  $R_C$ .

Pero para electrónica digital no tiene mucha importancia ese pequeño margen, por lo tanto se desprecia.

Interruptor en posición 2:

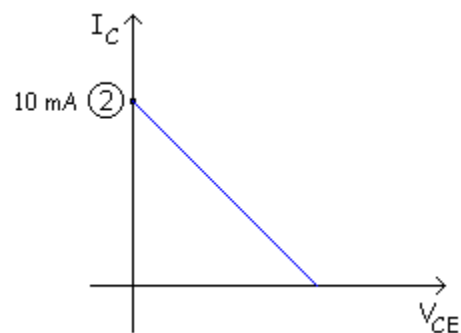
② IDEAL  $V_{BE_{sat}} = 0$

$$V_{CE_{sat}} = 0$$

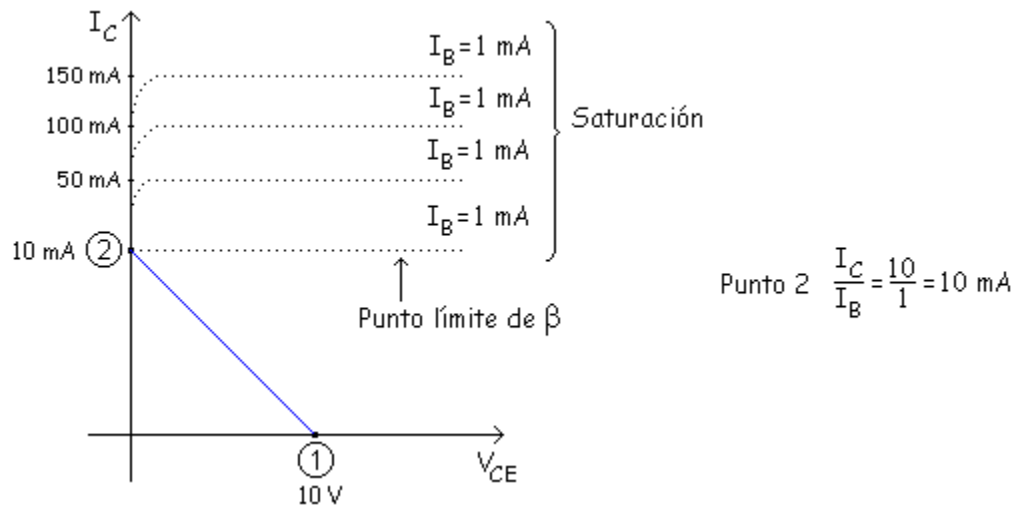
Hipótesis: SATURACIÓN

$$I_B = \frac{10-0}{10} = 1 \text{ mA}$$

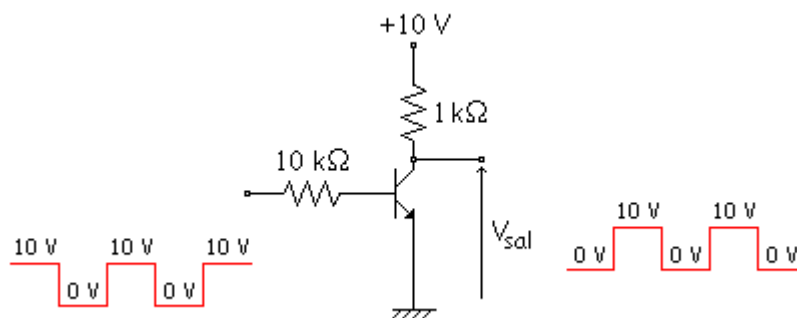
$$10 + 1 \cdot I_C + 0 = 0 \Rightarrow I_C = 10 \text{ mA}$$



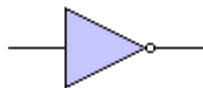
Finalmente tenemos una gráfica de la siguiente forma:



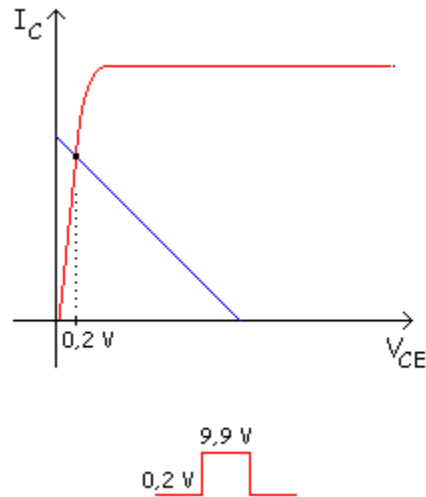
**Aplicación:** Si tenemos en la entrada una onda cuadrada.



Me invierte la  $V_{sal}$ , invierte la onda de entrada en la salida. Ese circuito se utiliza en electrónica digital.



A ese circuito le llamábamos "Circuito de polarización de base", que era bueno para corte y saturación, para conmutación. Pero este que hemos hecho no es exacto, lo exacto es:

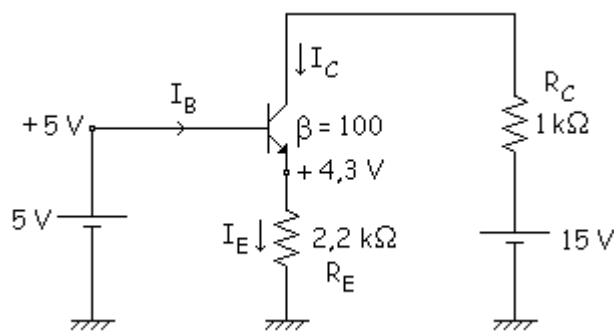


Entonces se cogen los márgenes, pero como están muy separados se desprecia y no se le da importancia a ese pequeño error.

## EL TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR DE SEÑAL

### Circuito con polarización de emisor

Si se quiere amplificar una señal, se necesitan circuitos cuyos puntos Q sean inmunes a los cambios en la ganancia de corriente, nos interesa que el punto Q sea lo más estable posible. Para este propósito ahora se analizará el "Circuito de polarización de Emisor", que es el siguiente:



El propósito es amplificar, por esa razón el transistor tiene que trabajar en la zona ACTIVA.

Como estamos en activa  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ . Por lo tanto y viendo la malla de entrada la tensión  $V_C$  será de  $4.3 \text{ V}$ . Entonces la intensidad  $I_E$  por la resistencia  $R_E$  será de:

$$I_E = I_C = \frac{4,3}{2,2} = 1,95 \text{ mA}$$

La malla de salida:

$$-15 + 1 \cdot I_C + V_{CE} - 4,3 = 0 \Rightarrow V_{CE} = 8,8 \text{ V}$$

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} - R_E \cdot I_C = 0$$

$$-V_{CC} + I_C \cdot (R_C + R_E) + V_{CE} = 0$$

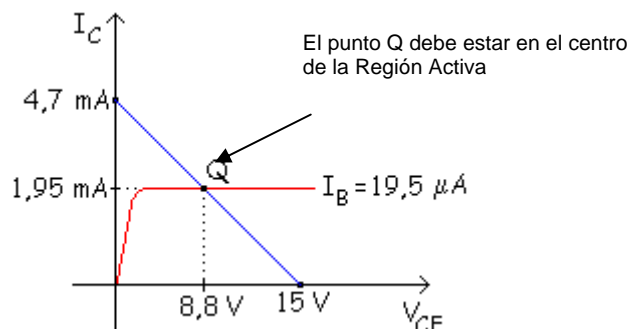
$$I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$$V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{15}{1 + 2,2} = 4,7 \text{ mA}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 15$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{CC}} = \frac{1,95}{100} = 19,5 \mu\text{A}$$

Gráficamente:



¿Que ocurre si el  $\beta_{cc}$  varía?

Si  $\beta_{cc} = 150$  solo varía  $I_B$ .

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{CC}} = \frac{1,95}{150} = 13 \mu\text{A}$$

Varía la  $I_B$  pero lo demás se mantiene y Q no varía, el transistor se autorregula y hace que varíe  $I_B$  sin que nada más varíe, por lo tanto:

"El punto Q es muy estable".

Pero esto no es del todo exacto, porque algo varía, esto se verá si no se usa la aproximación de  $I_C = I_E$ . Sin esta aproximación tenemos:

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_E = \frac{I_C}{\beta_{CC}} + I_C$$

$$I_C = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}} \cdot I_E$$

Y ahora si influye el  $\beta_{CC}$ .

$$I_C = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}} \cdot I_E = \frac{100}{1 + 100} \cdot 19,5 = 19,3 \text{ mA}$$

Y tendríamos:  $V_{CE} = 8,77 \text{ V}$

Con  $\beta_{CC} = 150$ :

$$I_C = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}} \cdot I_E = \frac{150}{1 + 150} \cdot 19,5 = 1,937 \text{ mA}$$

Con  $\beta_{CC} = 50$ :

$$I_C = \frac{\beta_{CC}}{1 + \beta_{CC}} \cdot I_E = \frac{50}{1 + 50} \cdot 19,5 = 19,117647 \text{ mA}$$

Varía algo, pero es bastante estable, es bueno para trabajar en activa.

## CLASES DE AMPLIFICACIÓN

La clase de un amplificador define la parte de la señal de entrada que se reproduce en la salida.

- Clase A** Amplifican la señal de entrada en toda su amplitud sin distorsión.
- Clase B** Amplifican únicamente el semiciclo positivo de la señal de entrada.
- Clase C** Amplifican un tramo de la señal de entrada inferior a un semiciclo.
- Clase AB** Amplifican más de un semiciclo sin llegar al ciclo completo.

Esta característica del amplificador depende de la posición del punto de trabajo del transistor en la recta de carga.

### **Amplificadores clase A**

Poseen su punto de trabajo en el centro de la recta de carga. De esta forma, consiguen la mínima distorsión de la señal de salida, reproduciendo la totalidad de la señal de entrada  $360^{\circ}$ .

Sin embargo, debido a la situación del punto de trabajo, el transistor está sometido a la mitad de la tensión de alimentación y por él circula la mitad de la corriente de saturación, incluso en ausencia de señal de entrada. Por ello la potencia perdida constantemente en este tipo de amplificador es considerable y su rendimiento bajo (hasta el 50%).

Esta configuración suele emplearse en preamplificadores que buscan amplificar señales débiles sin distorsión pero con bajas potencias y son desechados para su uso en amplificación de grandes potencias.

### **Amplificadores clase B**

En estos amplificadores el punto de trabajo se sitúa en la zona de corte de la recta de carga.

Ésto se consigue con una polarización de la unión base-emisor nula. El transistor no conduce en reposo y sólo lo hará cuando la señal de entrada le proporcione la polarización adecuada.

La corriente absorbida de la fuente en ausencia de señal de entrada es nula y con ello se reduce la potencia disipada y se incrementa considerablemente el rendimiento.

Sin embargo, sólo reproduce un semiciclo  $180^{\circ}$ , por lo que la distorsión producida es muy grande.

### **Circuito push-pull**

Con la configuración representada en la figura siguiente, denominada push-pull, se consigue polarizar en clase B dos transistores de forma que cada uno de ellos reproduzca a la salida el semiciclo que el otro no reproduce, generando una salida total de onda completa que reproduce en su totalidad a la entrada.

Existen circuitos push-pull que evitan el uso de transformadores, como el del circuito siguiente, donde se han conectado en contrafase dos transistores, uno NPN y otro PNP. Los transistores deben cumplir cierta simetría para que la caída de tensión en cada transistor sea la mitad de la de alimentación. Así mismo, las resistencias de polarización deben elegirse de tal forma que el punto de trabajo de ambos transistores se sitúe en la zona de corte.

Debido a que los transistores no empiezan a conducir hasta superar unos 0,6 voltios de tensión entre la base y el emisor, en la zona próxima al paso por cero de la señal de entrada los transistores no conducen y se produce una distorsión en la salida en esta zona.

Para evitarlo es necesario aplicar a los transistores una pequeña polarización desplazando el punto de trabajo un poco más arriba en la recta de carga, por encima de la zona de corte, con lo que los transistores trabajarán ahora en clase AB.

### **Amplificadores clase AB**

Como ya adelantamos anteriormente, en este tipo de amplificadores el punto de trabajo se sitúa entre la zona de corte y el punto medio de la



recta de carga, con lo que la señal reproducida a la salida es mayor de un semiciclo sin llegar a serlo en toda su amplitud.

Suele trabajarse en la zona próxima al corte, con lo que se consigue buen rendimiento con baja distorsión, siendo muy utilizados en las etapas finales de potencia de los circuitos de audio.

### **Amplificadores clase C**

El punto de trabajo se sitúa en este caso por encima del punto medio de la recta de carga y la señal reproducida no llega a completar un semiciclo de la señal de entrada. Su uso está muy restringido a casos especiales, tales como transmisores de potencia de emisoras.

## **DE ACUERDO A SU FRECUENCIA**

### **Amplificadores de corriente continúa**

Los amplificadores de corriente continua trabajan con señales no alternativas, es decir, de frecuencia cero.

### **Amplificadores de sonido**

Los amplificadores de sonido, de uso común en radios, televisiones y grabadoras de cintas, suelen funcionar a frecuencias audibles, entre 20 Hz y 20 KHz. (1 k.o. = 1.000 ciclos por segundo). Amplifican la señal eléctrica que, a continuación, se convierte en sonido con un altavoz. Los amplificadores operativos, incorporados en circuitos integrados y formados por amplificadores lineales multifásicos acoplados a la corriente continua, son muy populares como amplificadores de sonido.

### **Amplificadores de vídeo**

Los amplificadores de vídeo se utilizan principalmente para señales con un rango de frecuencias de 20 Hz a 15 MHz (1 MHz = 1 millón de ciclos por segundo). La señal generada por el amplificador se convierte en la información visual que aparece en la pantalla de televisión, y la amplitud de señal regula el brillo de los puntos que

forman la imagen. Para realizar esta función, un amplificador de vídeo debe funcionar en una banda ancha y amplificar de igual manera todas las señales, con baja distorsión.

### **Amplificadores de radiofrecuencia**

Estos amplificadores aumentan el nivel de señal de los sistemas de comunicaciones de radio. Por lo general, sus frecuencias van desde 100 KHz. hasta 300 MHz.

### **Amplificadores de VHF y UHF**

Trabajan en frecuencias de MHz o GHz (1 GHz = 1.000 millones de ciclos por segundo), y se utilizan para la transmisión de señales de audio y televisión.

## **LA DISTORSIÓN EN LOS AMPLIFICADORES**

El concepto de distorsión es de gran importancia para describir el comportamiento de las señales a la salida de los amplificadores.

Prácticamente, la distorsión interesa especialmente en los circuitos de alta fidelidad, porque en los de tipo industrial se renuncia al aspecto de la señal en beneficio de un elevado rendimiento en la mayoría de las ocasiones.

La distorsión resulta verdaderamente importante en los circuitos de alta potencia y en especial cuando las ganancias de las etapas han de ser elevadas.

A la hora de adquirir un amplificador, es uno de los datos más importantes a tener en cuenta, ya que además de buscar una potencia sonora es preciso que la reproducción del sonido tenga las mismas características (fidelidad) que la señal aplicada a la entrada del amplificador.

## **ACOPLAMIENTO ENTRE ETAPAS**

Los circuitos de media y baja potencia admiten básicamente tres modalidades de acoplamiento:

### **ACOPLAMIENTO DIRECTO**

Las diferentes etapas están enlazadas directamente. Presentan una gran dificultad de diseño ya que están interrelacionados los puntos de funcionamiento de cada uno de los transistores de forma que en la polarización de cada uno interviene el anterior y el siguiente.

Tienen el inconveniente adicional de que son sensibles a las derivas térmicas o de cualquier otro tipo que se produzcan, las cuales son amplificadas, por lo tanto exigen unas consideraciones muy rigurosas al realizarlos.

Su gran ventaja es que son capaces de trabajar desde frecuencia cero (corriente continua) lo que les hace atractivos en aquellas aplicaciones en que las variaciones de señal son muy lentas.

### **ACOPLAMIENTO RC POR RESISTENCIA Y CONDENSADOR**

Es uno de los métodos de acoplamiento más empleados por su efectividad aunada a su bajo coste, mucho más que el acoplamiento directo.

En realidad, el acoplamiento entre las etapas se efectúa por el condensador, puesto que la resistencia actúa como carga de la primera etapa.

El condensador impide que el valor de continua que acompaña a la señal de salida pueda saturar la base del transistor siguiente. Debe ser de gran capacidad para presentar la menor reactancia posible al paso de las componentes variables.

Puede utilizarse este acoplamiento en las etapas montadas en base común y en colector común, aunque este último caso no es recomendable debido a la débil potencia que suministra a la salida. De

todos modos, no es un acoplamiento inductivo. Una bobina en lugar de la resistencia permite obtener un elevado rendimiento en potencia pero atenúa las bajas frecuencias, ya que estas serían derivadas a masa a través de ella.

## **ACOPLAMIENTO POR TRANSFORMADOR**

Las etapas amplificadoras en las que no importe demasiado el coste del equipo y en las que, además del acoplo entre las mismas, se pretende adaptar las impedancias para conseguir una mayor potencia a la salida de cada paso, recurren a la utilización de transformadores.

El transformador modifica los valores de tensión y de corriente de manera que antes y después del transformador se mantiene casi constante la potencia, adaptando además los valores de tensión y corriente en cada circuito.

No existirá corriente continua de polarización a la salida del transformador porque este actúa solamente para la señal que sufre variaciones con el tiempo.

Los transformadores de acoplamiento deben calcularse para una determinada frecuencia de trabajo o ser ajustables para así poder adaptar en cualquier caso las impedancias.

Las impedancias de salida son muy elevadas porque la unión de colector tiene polarización inversa, en consecuencia, el transformador tiene en estos casos menos espiras en el secundario que en el primario porque la impedancia de entrada de estas etapas es baja comparada con la de salida del paso anterior.

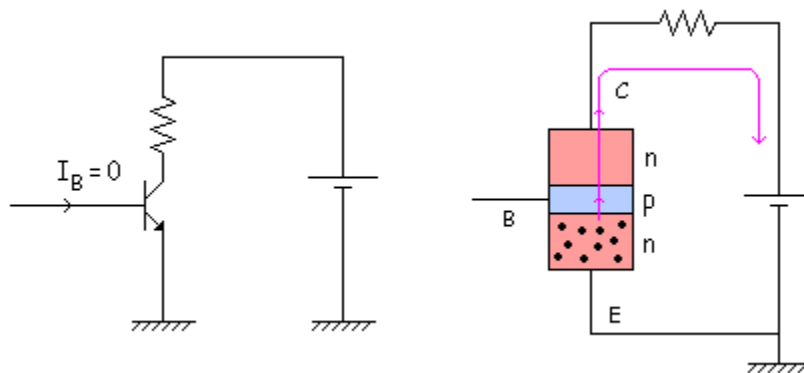
La respuesta en frecuencia no es tan buena porque las inductancias que forman los devanados presentan diferente oposición a las distintas frecuencias.

El acoplamiento sintonizado entre etapas se realiza a través de un circuito resonante. Por lo tanto, su ganancia será elevada para una determinada frecuencia o margen de frecuencias, bajando sensiblemente fuera de esta banda. Para el acoplamiento se utiliza un sistema de bobina y condensador o un transformador con o sin núcleo

magnético que separa los niveles de continua, realizándose la sintonía con un condensador acoplado al primario, secundario o ambos.

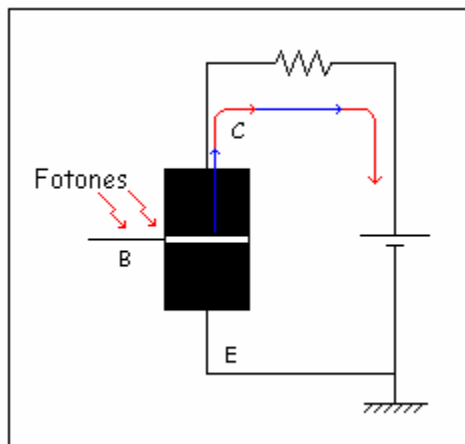
## FOTOTRANSISTOR

Es un transistor con la base al aire. Veamos que ocurre dentro del transistor:

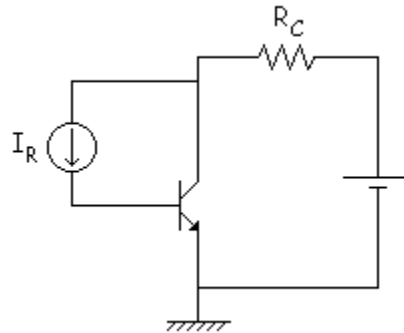


Ocurre la generación térmica y se cierra una malla para los electrones minoritarios. Se pinta de negro el transistor dejando una rendija para que entre la luz. Con esto tenemos fotones que hacen que la corriente aumente, cuanto más fotones halla más aumentará la corriente.

En esta podemos ver mediante una grafica el comportamiento del fotodiodo, que aumenta su corriente gracias a los fotones de luz que recibe.



Para analizar esto veremos un símil equivalente, esto es un circuito que se comportaría como es fototransistor.



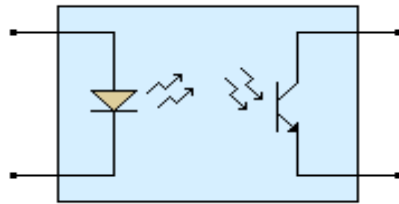
$I_R = I_S + I_f$  pero despreciamos  $I_f$ , además debido al efecto de la luz se crea una corriente que se suma a la  $I_R$ , por lo tanto tenemos:

$$I_R = I_S + I_{luz}$$

Fototransistor tiene una corriente  $\beta$  veces mayor que el fotodiodo por estar  $I_C$  multiplicado por  $\beta$  ( $I_C = \beta \cdot I_R$ ). Con la misma luz tengo  $\beta$  veces más corriente, es más sensible a la luz.

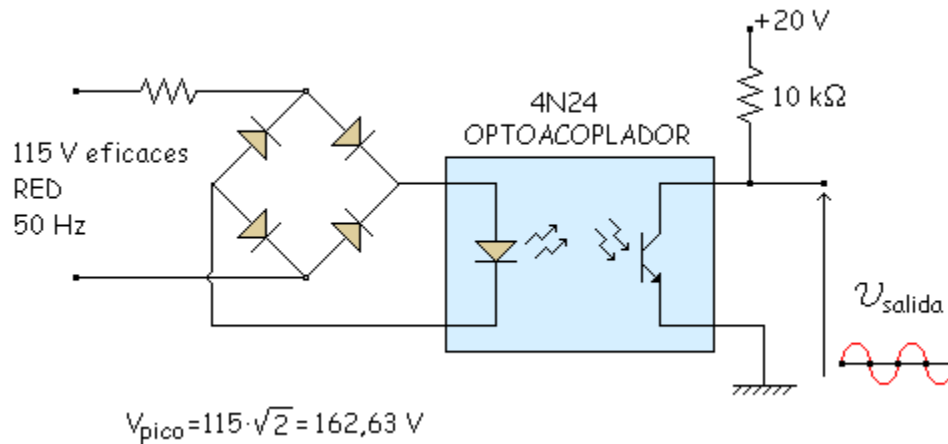
### Optoacoplador con Fototransistor

Esta basado en el Fototransistor



Veremos el uso del Optoacoplador con Fototransistor con un ejemplo.

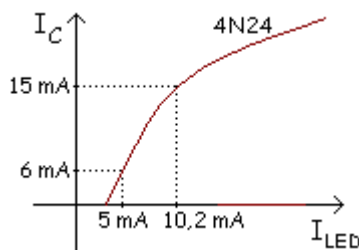
### EJEMPLO: Detector de paso por cero



Como su propio nombre indica su objetivo es detectar cuando el circuito pasa por cero.

$$I_{P_{\text{LED}}} = \frac{162,63 - 0,7 - 0,7 - 2}{16} = 10,2 \text{ mA}$$

Viendo en el catálogo: Esta gráfica solo se cumple en el caso de que se esté en activa.



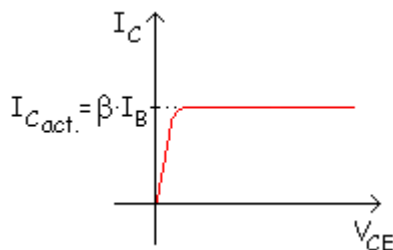
Ahora tenemos que saber donde nos encontramos. Hipótesis: SATURACIÓN.

$$V_{CE_{sat}} = 0$$

$$I_C = \frac{20 - 0}{10} = 2 \text{ mA}$$

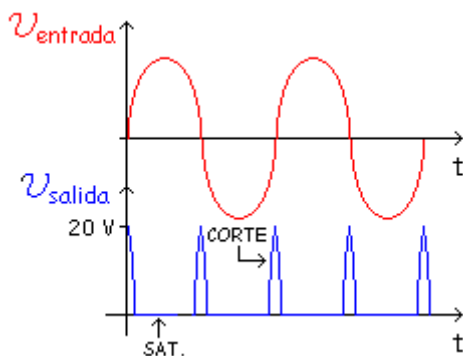
$$I_C > I_{C_{act.}}$$

$$\underline{\underline{2 \text{ mA} > 15 \text{ mA}}}$$



Como vemos trabaja en **Saturación** (los Optoacopladores siempre trabajan en Saturación, al diseñarlos hay que tener en cuenta esto).

En el pico de la onda de entrada  $V_{sal} = 0 \text{ V}$ . Se le dan distintos valores hasta que se salga de saturación, que ocurrirá en un punto cerca de  $0 \text{ V}$ . Después pasará a saturación y ya no emitirá luz.



En cada paso por cero hay un pico en el que pasa de saturación a corte y luego a saturación seguido. Con esto se detecta el paso por cero. Además de aislar el circuito de la red.

Resumiendo: Este circuito es un detector de paso por cero y además está aislado de la red.

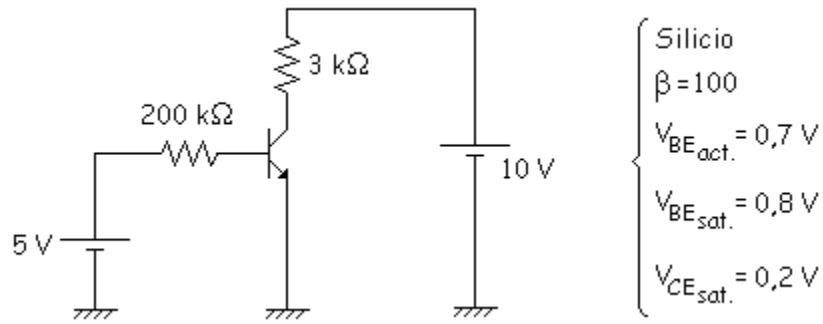
**Aplicación:** En osciloscopios, ya que en estos hay que saber cuando se pasa por cero.

## Problemas

### Problema 7.1

Calcular la recta de carga y el punto Q de forma gráfica.



**Solución:**

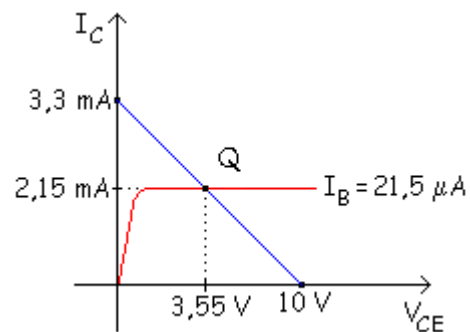
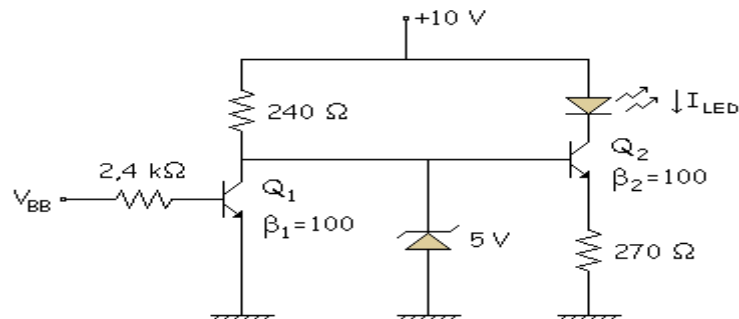
Hipótesis: Activa.

$$-5 + 200 \cdot I_B + 0,7 = 0 \Rightarrow I_B = 0,0215 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0,0215 = 2,15 \text{ mA}$$

$$-10 + 3 \cdot 2,15 + V_{CE} = 0 \Rightarrow V_{CE} = +3,55 \text{ V}$$

Fijándonos en el dibujo vemos que estamos en activa, por lo tanto la suposición es correcta. Calculamos la recta de carga como se ha visto en la teoría, y finalmente tenemos:

**Problema 7.2**

a)  $V_{BB} = 0 \text{ V}$

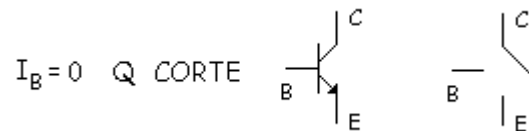
b)  $V_{BB} = 10 \text{ V}$

Ver lo que ocurre en el circuito en cada uno de estos casos.

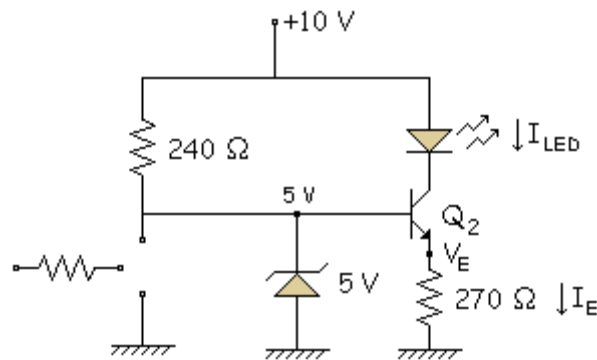
**Solución:**

Este es un circuito típico en el que los transistores están conmutando (conduce, no conduce, conduce, etc...).

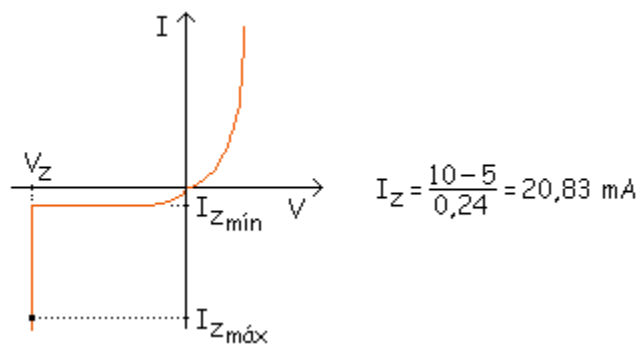
a)  $V_{BB} = 0 \text{ V}$



El circuito queda de la forma siguiente:



Algún  $\mu\text{A}$  va a  $Q_2$  pero lo despreciamos. Vemos que el zener está en ruptura:

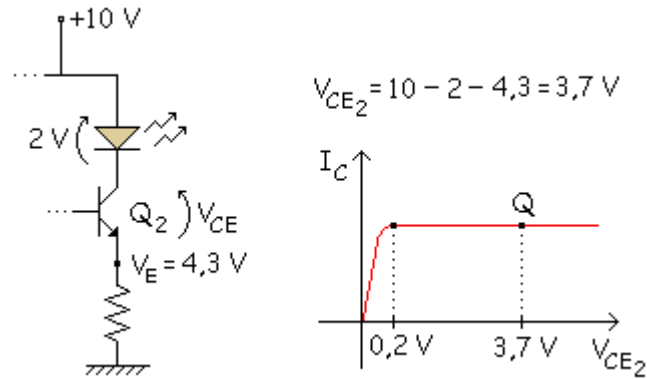


Hay que saber ahora si el Led está encendido con esa corriente.

$$V_E = 5 - 0,7 = 4,3 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{4,3}{0,27} = 15,92 \text{ mA} \approx I_{LED}$$

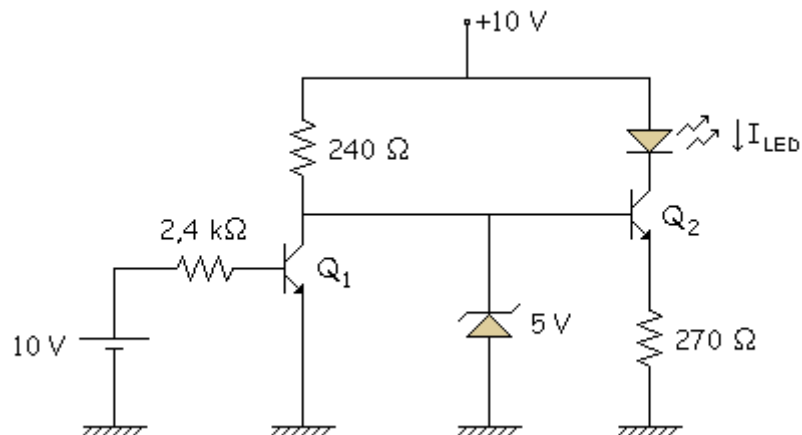
Ahora hay que ver en que zona trabaja el transistor  $Q_2$ .



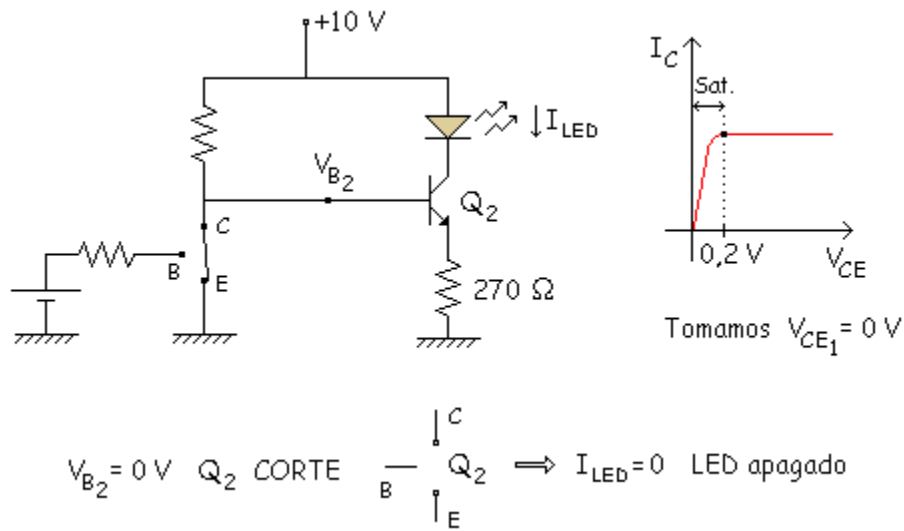
Como se ve el transistor  $Q_2$  trabaja en activa. Resumiendo vemos como ha quedado:

- $Q_1$  CORTE.
- $Q_2$  ACTIVA.
- LED se enciende.

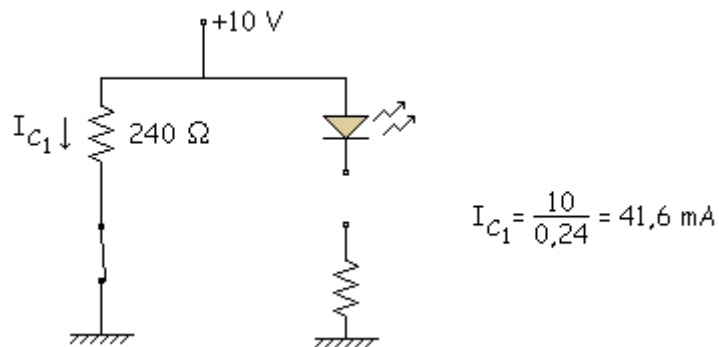
b)  $V_{BB} = 10 \text{ V}$



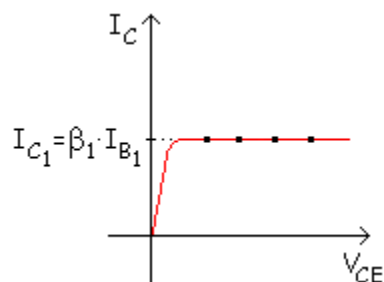
Hipótesis:  $Q_1$  SATURACIÓN



El zener está en inversa, no funciona. Comprobamos si la hipótesis es correcta.



Si estuviera en activa:



Si se encuentra en saturación se cumple:

En activa  $I_{B_1}$  vale:  $I_{B_1} = \frac{10 - 0,7}{0,24} = 3,875 \text{ mA}$

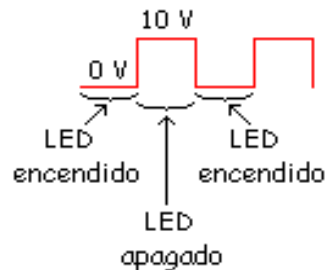
$$I_{C_1} < \beta_1 \cdot I_{B_1}$$

$$41,6 \text{ mA} < 100 \cdot 3,875 \text{ mA}$$

$$41,6 \text{ mA} < 387,5 \text{ mA}$$

Si se cumple, está en SATURACIÓN.

**Aplicación:** Si tuviéramos un tren de pulsos a la entrada:



Esto nos podría valer, por ejemplo, para controlar alarmas.

### **BIBLIOGRAFIA:**

Material preparado por Ing. Martín E. Duran Instructor de electrónica centro de tecnología de la manufactura avanzada SENA Regional Antioquia. Septiembre de 2007

Tomado de curso de electrónica básica en Internet Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial EIBAR(España) Autor: Andrés Aranzabal Olea