

EL TRANSISTOR

Inventado en la década de los 50 por SHOKLEY, BARDEEN Y BRATTAIN .

Se encuentra presente en todos los sistemas electrónicos discretos e integrados que realicen cualquier tratamiento de señales .

Existen 2 grandes grupos de transistores .

UNIPOLARES

BIPOLARES o TBJ (Transistor bipolar de juntura)

Esta clasificación se basa en el tipo de portadores de carga (electrones y/o huecos) que intervienen en el proceso de conducción . El primer transistor descubierto fue el bipolar y es este el que comenzaremos a estudiar .

DESCRIPCION BASICA .

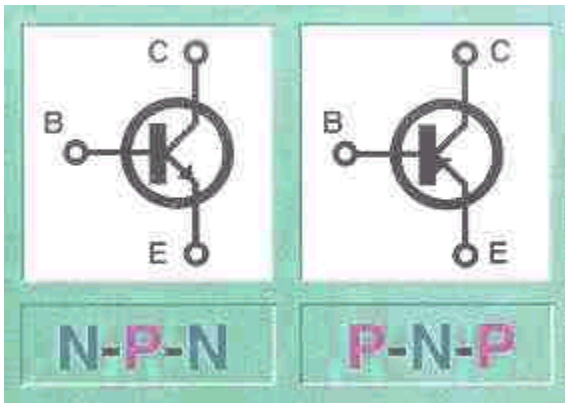
Es un dispositivo cuya resistencia interna puede variar en función de la señal de entrada .

Esta variación de resistencia provoca que sea capaz de regular la corriente que circula por el circuito al que se encuentra conectado. De dicho comportamiento como resistencia variable se deriva su nombre del ingles : TRANSfer - reSISTOR.

Un transistor de unión bipolar es un cristal semiconductor en el que una zona tipo P o N esta entre medio de otras dos N o P.

Así tenemos dos tipos : NPN o PNP.

El conjunto así formado se encierra herméticamente en una cápsula metálica o de plástico. Presenta al exterior tres terminales de conexión que parten de cada una de las regiones semiconductoras.

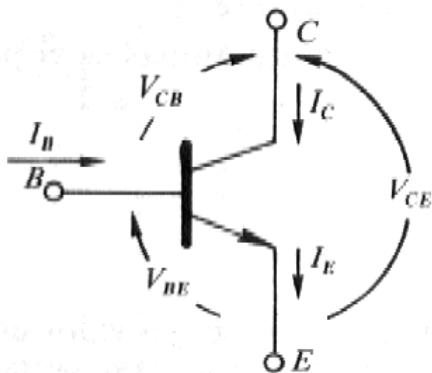


Así, teóricamente hablando tenemos dos uniones PN, que asemejan la presencia de dos diodos , pero tengamos en cuenta que es solo una comparación, no esperemos que uniendo dos diodos en serie tendremos un transistor. El porque es debido a la diferente geometría y mas concretamente a las dimensiones de la base y a los diferentes niveles de dopado en cada región del transistor.

POLARIZACION

El transistor tiene dos junturas. Recordando los conceptos vistos en diodos, resulta fácil de deducir que mediante aplicación de tensiones en estas dos junturas podremos variar la circulación de portadores en las mismas y llevar al dispositivo a algunas de las zonas de trabajo que luego veremos. Recordemos que en una juntura en directa si el semiconductor es silicio, cae aproximadamente 0.7v, y si está en inversa una tensión mayor.

TENSIONES Y POLARIZACIONES



Dada la figura del transistor, nos atenderemos a los siguientes convenios.

Las flechas de corriente indican el sentido convencional (de positivo a negativo).

Las letras de tensiones y corrientes y sus subíndices en mayúsculas son referidas a CC y en minúsculas a CA.

Los subíndices, en magnitudes referidas a transistores , indican el terminal o terminales a que afectan.

El mismo subíndice dos veces, representa el voltaje que alimenta ese terminal.

Un subíndice 0 indica que el terminal que no esta presente esta en circuito abierto

(O es de OPEN).

En caso de dos subíndices, se toma el primero como positivo.

Un único subíndice en tensiones, representa el voltaje entre ese terminal y masa.

Ejemplos :

VCE tensión de CC entre colector y emisor.
IB corriente d base de CC.
IB corriente de base en CC.
VCC tensión de alimentación de colector.
VE tensión de CC , entre emisor y masa.

Por la ley de nodos :

$$I_E = I_B + I_C$$

Generalmente se observa que IC es mucho mayor que IB y la relación entre ambas es el parámetro beta o HFE cuando el transistor está trabajando en la zona que llamaremos activa:

$$\beta = I_C / I_B$$

Valores típicos de β son de 50 a 500, encontrándose transistores cuyo valor es superior a 1000.

Al parámetro β se suele encontrar en las hojas de datos como HFE .

Por ley de mallas :

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

NOTA: En cualquier condición del transistor se cumple siempre que :

$$I_E = I_B + I_C$$

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

Ya que estas surgen de las leyes de Kirchoff.

FUNCIONAMIENTO

Polarizaremos el transistor y procederemos a variar algunos parámetros viendo la evolución del resto.

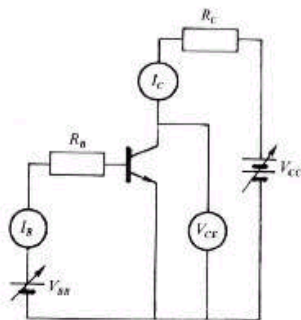
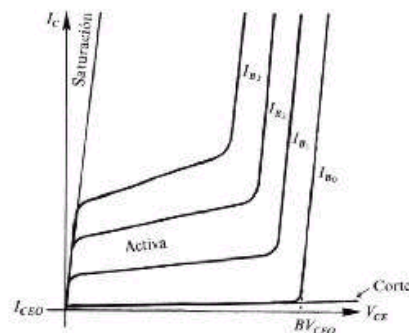


Figura 7.7. Disposición para obtener las características de colector.



Gráfica 7.1. Familia de curvas características de colector.

En el circuito mostrado supondremos que V_{BB} y V_{CC} son ajustables es decir que podemos variar a voluntad ; al hacerlo implicará que todas las corrientes y tensiones son susceptibles de variación. R_C y R_B limitan las corrientes máximas que pueden circular por el transistor .

Ajustando V_{BB} podremos ajustar los valores de I_B , pues bien, manteniendo constante dicha corriente a un valor determinado y variando V_{CC} variaremos a su vez V_{CE} , lo que implica una posible variación de I_C , con estos datos construiremos una gráfica de I_C en función de V_{CE} con I_B constante. Si ajustamos nuevos valores de la corriente de base y repetimos el proceso, obtendremos nuevas curvas. A la familia de curvas obtenidas se las llama CURVAS CARACTERÍSTICAS DE COLECTOR.

Cuando $I_B = 0$ para $V_{CE} = 0$ $I_C = 0$, si se va aumentando la tensión V_{CE} vemos que la corriente de colector se estabiliza rápidamente aunque a un valor muy bajo, algunos nA o uA dependiendo del tipo de transistor. Ello es debido a la corriente de fuga del diodo base colector que se encuentra en inversa y se le denomina I_{CBO} . Si se sigue aumentando la tensión V_{CE} se alcanza la región de ruptura por avalancha donde el transistor se destruye irremediabilmente, a este valor se le denomina BV_{CEO} , los fabricantes indican un valor BV_{CEOmax} , que no ha de ser sobrepasado en ninguna circunstancia para evitar el posible deterioro del componente. Para un valor superior de I_B , en el origen, $V_{CE} = 0$, la corriente de colector es nula, para pequeños aumentos de la tensión V_{CE} , I_C crece rápidamente, y a partir de algunas décimas de volts, se hace prácticamente constante, o mas exactamente los incrementos son muy pequeños.

Incrementando de nuevo VCE se alcanzará de nuevo la tensión de ruptura, aunque en este caso a un valor inferior que para $I_B = 0$. Repitiendo el proceso para nuevos valores de la corriente de base, los hechos se repiten: I_C se hace prácticamente constante a valores más elevados y cada vez va alcanzando antes la tensión de ruptura. A medida que la corriente de base se va haciendo mayor, la pendiente de la curva aumenta entre los puntos de codo y de ruptura, ello implica conjuntamente con los aumentos de I_C provocados por los incrementos de la tensión colector-emisor, que β no es constante, pues si así fuera en cualquier punto de la curva la relación I_C / I_B sería la misma y es fácil comprobar que no lo es. Las hojas de datos de los fabricantes suelen dar dos valores de β o también llamado (HFE).

Por ejemplo para el BC548 podemos observar que nos da un valor de β mayor de 200 pero menor que 450.

En la familia de curvas recién mencionada podemos distinguir tres zonas, que son las zonas en que puede trabajar un transistor.

SATURACION

Es la zona comprendida entre el origen de coordenadas y el codo de las curvas, en ella el diodo base-colector está polarizado en directa y el transistor se comporta como una pequeña resistencia. En esta zona el aumento adicional de la corriente de base no provoca un aumento de la corriente de I_C , sino que esta depende de la tensión entre colector y emisor exclusivamente. En estas condiciones, el transistor se asemeja, en su circuito colector-emisor a un interruptor cerrado (saturado) y la corriente que circula por el circuito de colector ha de ser limitada por el circuito exterior, es decir se pierde el control de la corriente I_C a través de la I_B , por lo tanto la relación $\beta = I_C / I_B$ ya no es válida.

ACTIVA O LINEAL

Para valores de VCE, comprendidos entre un voltio aproximadamente y valores cercanos a V_{CEmax} se encuentra la zona activa. En este intervalo el transistor se comporta como una fuente de corriente, determinada por la corriente de base. A pequeños aumentos de I_B corresponde grandes aumentos I_C , de forma casi independiente de VCE. Para hacer trabajar el transistor en esta zona las polarizaciones han de ser tal que el diodo base-emisor esté en directa y el diodo base-colector en inversa.

CORTE

El hecho de hacer la corriente de base igual a cero es equivalente, a mantener este circuito abierto. En estas circunstancias la corriente de colector es tan pequeña que si la despreciamos, podemos comparar el transistor, su circuito colector-emisor, como un interruptor abierto, y se dice que el transistor está en corte o simplemente cortado.

EXPECIFICACIONES MAXIMAS

Como elemento físico real el transistor tiene limitaciones en sus condiciones de trabajo, que no deben ser sobrepasadas para asegurar la vida del componente. Dicha información la encontramos en las hojas de datos dadas por el fabricante. Las más importantes son:

VCEO máxima tensión colector-emisor a base abierta
VCBO máxima tensión colector-base a emisor abierto
VEBO máxima tensión emisor-base a colector abierto
VCES máxima tensión colector-emisor con tensión $V_{BE} = 0$
 I_{Cmax} máxima corriente de colector en régimen continuo
 I_{CMmax} máxima corriente de pico de colector
 I_{BMmax} máxima corriente de pico de base

P_{tot} máxima potencia disipable. Según esta característica se dividen en transistores de pequeña señal P_{tot} menores de 500 mW y de potencia para potencias mayores.

Es conveniente limitar los valores reales en régimen de trabajo, al menos a $\frac{1}{2}$ de los máximos especificados con el fin de asegurar un factor de seguridad, como mínimo de 2. Este factor de seguridad expresa la relación entre los valores máximos admisibles y los reales de trabajo. Recordemos que los valores elevados de tensión ocasionan ruptura por avalancha y que valores elevados de corrientes generan un exceso de calor

que influye en las corrientes de fuga, modificando por completo las condiciones de trabajo y llegando en situaciones extremas a la destrucción del dispositivo .

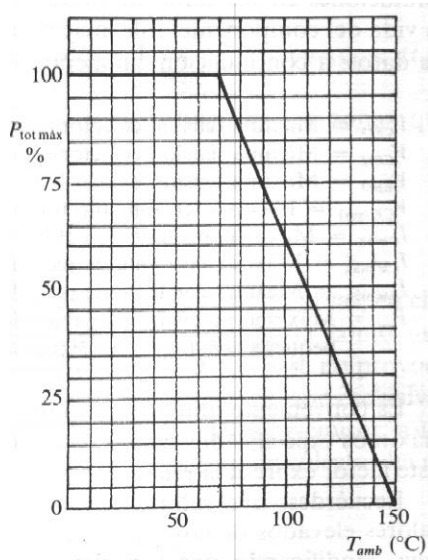
La potencia total es la suma de las disipadas en el circuito de base y en el circuito de colector . Como la corriente de base es muy baja frente a la de colector, se puede despreciar y considerar, por aproximación, la potencia total como :

$$P_{tot} = V_{CE} \times I_C$$

Dado la importancia que tiene este parámetro de la potencia total disipada por el transistor, en las hojas de dato suele encontrarse dos tipos de gráficas :

CURVA DE MAXIMA POTENCIA

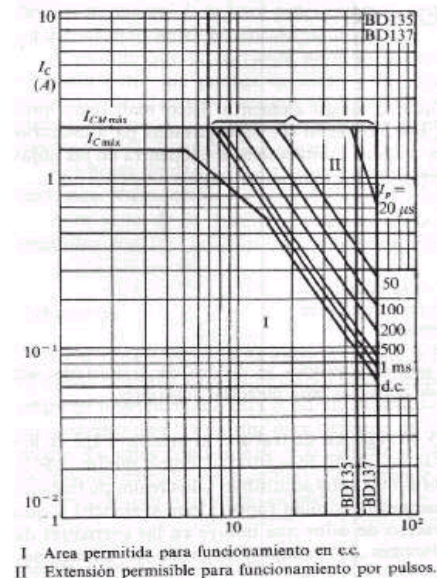
Expresa la máxima potencia disipable en términos de pares de valores de I_C y V_{CE} Nótese que esta varía en función de la duración en el tiempo de las condiciones de trabajo y de las temperaturas de operación.



CURVA DE DEGRADACION DE POTENCIA

Da información acerca de la potencia disipable en función de la temperatura.

CURVA DE MAXIMA POTENCIA



VERIFICACION DE LOS TRANSISTORES

Una primera manera se nos ocurre al recordar que tenemos dos diodos base colector y base emisor (atendiendo además a que si se trata de un transistor PNP o NPN). Por ejemplo con un ohmetro analógico en la menor escala, cada diodo deberá conducir en un sentido y no en el otro . Algunos multímetros digitales suelen traer una función para prueba de diodos y otro incluso para prueba de transistores, dándome como información el valor del parámetro β . Sin embargo se debe tener en cuenta que el valor mostrado es bajo determinada condición de ensayo, el HFE puede ser diferente en mi circuito, lo correcto es mediante la hoja de datos buscar alguna medición del HFE que el fabricante hubiera hecho bajo condiciones similares a la que se encuentra trabajando el TBJ en mi circuito.

Otra es la conocida como la prueba del dedo. Se conecta las puntas de prueba de un polímetro analógico, función ohmios x 1, entre emisor y colector polarizándolo a través de la pila interna del óhmetro. A continuación se toca con un dedo la base y con otro el colector, la corriente proporcionada a la base a través de la resistencia interna de la mano, debe provocar una corriente de colector que hará desviar la aguja del instrumento. Si esta no se moviera o lo hiciera menos de la mitad de la escala el transistor estará defectuoso. Verificación mas fiable es la realizada a través de un transistómetro, aparato de laboratorio diseñado para tal fin.

POLARIZACION Y ESTABILIZACION

Anteriormente introducimos el parámetro β , que da muestra de la característica mas importante del transistor, su utilidad como amplificador de corriente. Sin embargo vimos también que el fabricante no lo da con certeza sino dentro de un rango a primera vista bastante amplio.

Además dicho parámetro varía con la temperatura (en algunos casos un aumento de 100 grados en la temperatura del transistor puede incrementar en un 50 % el valor de β). La tensión V_{BE} decrece en 2mV/C, y puesto que el transistor es siempre usado para realizar algún trabajo, es lógico que

su temperatura aumente por la generación de calor al circular corriente por el mismo. La corriente de fuga del colector (corriente inversa por el diodo base colector) también varía con la temperatura. En definitiva todo esto sugiere inestabilidad en las condiciones de trabajo en que se encuentre el transistor, es decir el mismo no respondería a la manera deseada en el diseño de un circuito en el que el forme parte.

A continuación se vera circuitos que proporcionan al transistor polarizaciones apropiadas, confiriéndole además una aceptable estabilidad de funcionamiento.

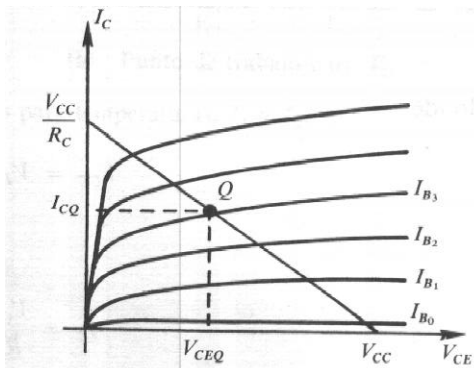
En la practica, es necesario fijar unas condiciones de trabajo y diseñar un circuito, en torno al transistor, que las satisfaga, no siendo tolerable que estas condiciones se cumplan unas veces sí y otras no .

Primero definiremos lo que es RECTA DE CARGA :

Una forma de visualizar las condiciones de trabajo del transistor es empleando las curvas de colector. Para ello nos serviremos de la recta de carga trazada sobre esas curvas .

Dicha recta se obtiene circulando por la malla de salida del circuito, y representa los posibles puntos de trabajo que le permite el circuito exterior al transistor.

Si representamos esta ecuación y la superponemos con la familia de curvas de colector, esta interceptará a alguna curva de la familia en un punto que llamamos Q, ese será el punto de trabajo del transistor (la figura muestra la recta de carga para el caso de POLARIZACION FIJA).



El punto Q siempre estará sobre la recta de carga y dependiendo de la corriente de IB el transistor estará operando en la zona de corte, para $I_B = 0$, en la zona activa o en la zona de saturación :

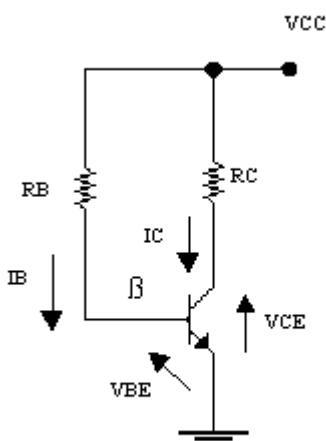
En corte , $I_C \approx 0$ y $V_{CE} = V_{CC}$.

En saturación $V_{CE} \approx 0$ (o casi cero) e I_C dependerá del circuito exterior, en nuestro caso $I_C = V_{CC} / R_C$ (si suponemos V_{CE} cero).

Notemos que en la región activa el punto Q estará determinado por un valor I_{CQ} y V_{CEQ} este punto se denomina punto de trabajo y determina las condiciones estáticas (o en continua) del transistor. Dado que Q depende de parámetros que a su vez dependen de la temperatura, resulta lógico que Q también varía con la temperatura.

A continuación mencionaremos algunas polarizaciones posibles para el TBJ, luego se desarrollará las fórmulas para el cálculo.

POLARIZACION FIJA



También llamada polarización de base. La corriente de base la proporciona VCC a través de R_B , con lo cual ambas polarizaciones se obtienen de una única fuente.

Haciendo la suposición de que el diodo base emisor esta en estado de conducción , es decir en directa

$$V_{BE} = 0.7 \text{ volts} \quad V_{RB} = R_B \cdot I_B$$

$$I_B = (V_{CC} - 0.7) / R_B$$

Como VCC es casos normales mucho mayor que $V_{BE} = 0.7v$, entonces las variaciones de V_{BE} (por ejemplo su variación con la temperatura) afectaran muy poco la corriente de base I_B , considerando que R_B se mantenga constante.

Notemos que esto parece habernos ayudado a corregir el problema de la variación de V_{BE} con la temperatura , ya que de alguna manera nos independizamos de ella en el valor de I_B

$$I_B \approx V_{CC} / R_B \quad (\text{despreciamos } V_{BE} \text{ solo en esta explicación})$$

sin embargo el parámetro β varía con la temperatura también, así que I_C también lo hará, recordemos que en la zona activa

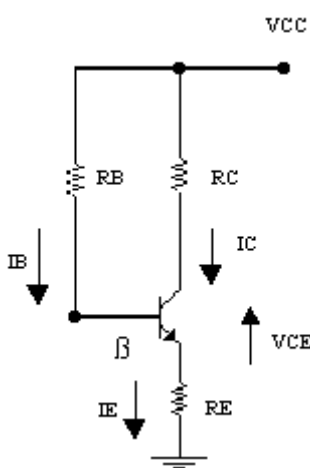
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Por lo tanto el punto de trabajo Q sufrirá desplazamientos. Es así que esta polarización no será conveniente en circuitos que necesitan que el transistor trabaje en la zona activa, ya que algún factor como la temperatura puede provocar que salgamos de esta zona. La aplicación de este circuito de polarización fija es usada cuando el transistor trabaja como conmutador, es decir entre corte y saturación.

POLARIZACION FIJA CON REALIMENTACION DE EMISOR

Realimentación debe asociarse a la idea de que señal de salida de un circuito es inyectada a la entrada del mismo produciendo cambios posteriores a la salida. Un ejemplo de esto es el efecto que se produce cuando un micrófono es colocado cerca del parlante del equipo amplificador al que está conectado, señal de salida, sonido es enviado, realimentado, a la entrada provocando su refuerzo a la salida, que es enviado nuevamente al micrófono, entrada, y nuevamente amplificada. Esto actúa como una "bola de nieve", y terminamos escuchando un silbido molesto, acople.

En este caso la realimentación contribuye a desestabilizar el circuito; sin embargo es posible hacer que esta realimentación sea útil para nuestro circuito. Por ejemplo supongamos que con señal de salida alimentamos un circuito que actúa sobre la entrada variando los parámetros necesarios para corregir una anomalía a la salida. Bien esto es utilizado frecuentemente en la electrónica al igual que en otras ramas de la tecnologías, sobre todo en el área de control automático. En nuestro caso veremos que cambios sufridos por la corriente de colector provocan cambios en la corriente de base.



Si calculamos I_B (luego veremos como hacerlo) se llega a que:

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / (R_B + (\beta + 1) \cdot R_E)$$

supongamos que por causas de la temperatura se produce un incremento en el valor de β , según lo visto esto debiera producir un aumento de la corriente de colector.

Pero observando la ecuación última, el aumento de β hace que el denominador crezca, por lo tanto la I_B debe disminuir, pero esto hace que I_C también disminuya, compensando el efecto del aumento del parámetro β .

De la misma manera podemos ver que se contrarrestan las posibles disminuciones de β .

Este efecto confiere cierta estabilidad al punto Q; esto se consigue gracias a que el emisor está sometido a una tensión variable, al contrario de una polarización fija en que estaba sometido a un potencial fijo (0V).

NOTA: usualmente R_E es aproximadamente $R_C / 10$.

Lo visto parece que solucionaría el problema de fijar el punto Q, sin embargo puede suceder que para compensar las variaciones de β , el valor de R_E debiera ser grande, lo cual podría provocar que el transistor entre en saturación.

Un intento de solucionar esta dificultad planteada es la siguiente polarización.

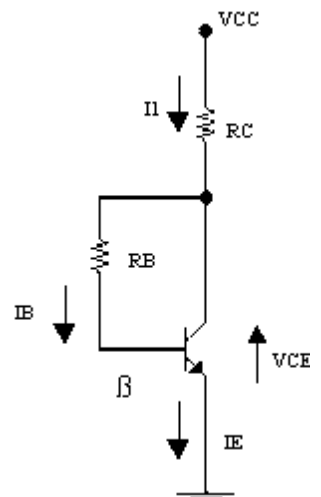
POLARIZACION POR REALIMENTACION DE COLECTOR

En esta disposición la señal de salida que influye sobre I_B se toma del colector. Observemos que R_B no se conecta a un potencial fijo sino a uno variable V_{CE} , si calculamos I_B :

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / (R_B + (\beta + 1) \cdot R_C)$$

Un análisis similar al visto en la polarización anterior puede aplicarse aquí. Si β aumenta, debiera aumentar I_C , pero en la ecuación anterior un aumento de β provocaría una disminución de I_B por lo tanto de I_C con lo que se compensa la variación de β .

Cualificando la estabilización de esta configuración, se observa que es mayor que en la de realimentación por



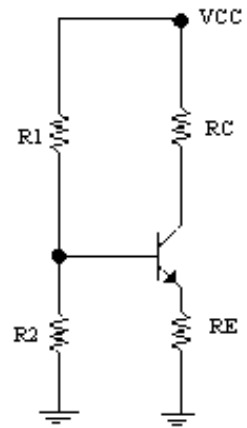
emisor, dicho de otra forma, compensa mejor las variaciones de β , ofreciendo como ventaja adicional que el transistor no llega a saturar. Además veamos que por mas que disminuyamos R_B , V_{CE} no puede descender por debajo de 0.7 v, caso correspondiente a V_{BE} en cortocircuito y entonces $V_{CE} = V_{BE} = 0.7 \text{ v}$.

POLARIZACION POR DIVISOR DE TENSION O AUTOPOLARIZADO

El nombre proviene del divisor $R_1 R_2$ con el que alimentamos la base. Esta es la forma más adecuada para hacer trabajar el transistor en la zona lineal o activa.

Establecido el punto de trabajo Q , tendremos determinados I_C y V_{CE} .

Si β aumenta entonces I_C tratará de aumentar, pero al circular por R_E elevará el potencial del emisor V_E , entonces I_B disminuirá compensando la variación de β . Lo mencionado se cumple también en el caso de que β disminuya.



RESUMEN:

La polarización permite justamente polarizar las dos junturas del TBJ y de esta forma llevarlo a alguna de las zonas de trabajo (saturación -activa -corte).

SATURACION	ACTIVA	CORTE
El TBJ se comporta como una llave cerrada entre colector y emisor.	El TBJ puede trabajar como amplificador	El TBJ se comporta como una llave abierta
JBE en directa (0.7v) JBC en directa o cercana	JBE en directa (0.7v) JBC en inversa (algunos volts)	JBE por debajo de 0.7v JBC en inversa (algunos volts)
NO VALE IC = B. IB	VALE IC = B. IB	IB (nula o casi nula) IC (nula o casi nula)
$V_{CE} < 0.7\text{v}$ (suponemos 0.1v en los cálculos)	$0.7\text{v} < V_{CE} < V_{\text{fuente}}$	NO VALE IC = B. IB
La IC depende del circuito exterior que conforma la malla de salida		$V_{CE} = V_{\text{fuente}}$ (o casi)

IMPORTANTE:

En el apunte POLARIZACION DEL TRANSISTOR se desarrolla el cálculo de las corriente y tensiones en algunas de las configuraciones posibles. (Se recomienda bajarlo).