

Transistores bipolares

Introducción

Antes de 1951, las válvulas eran el elemento principal empleado para amplificar señales débiles. A pesar que tienen ventajas frente a otros dispositivos amplificadores, tienen varias y serias desventajas:

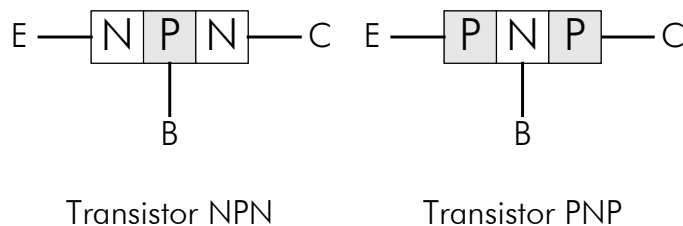
- Poseen un filamento interno de caldeo que consume energía adicional
- Tienen vida útil definida.
- Disipan gran cantidad de calor, elevando la temperatura interna de los equipos electrónicos.
- Tienen gran tamaño comparando con los transistores de similar potencia.

En 1951, Shockley inventó el primer transistor de unión, un dispositivo semiconductor capaz de amplificar señales superando los inconvenientes de las válvulas.

A partir del transistor se han logrado muchos otros inventos como el Circuito Integrado ó I.C. (Integrated Circuit).

Estructura

El transistor está constituido por tres regiones de material semiconductor. La unión de las tres regiones da origen a dos tipos de transistores: NPN y PNP.



La letra “E” denota el terminal denominado Emisor, “B” denota la Base y “C” el Colector.

En la figura anterior, podemos observar que cada tipo tiene dos uniones P-N. Éstas se denominan: Junturas base-emisor y colector-base.

El tipo de transistor que tiene esta estructura se denomina transistor de unión bipolar ó BJT (Bipolar Junction Transistor).

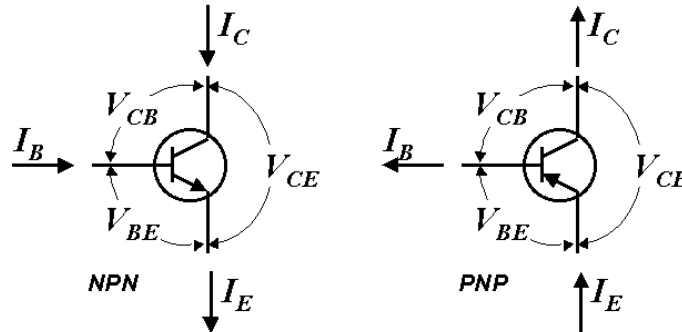
Los símbolos esquemáticos para los transistores bipolares se muestran en la siguientes figura:



Para designar un transistor en un circuito esquemático se utiliza la letra "Q" ó las letras "TR".

Intensidades y voltajes convenidos

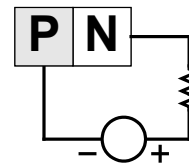
La forma de medir y expresar los voltajes e intensidades en un transistor se muestran en la siguiente figura:



Principio de funcionamiento del BJT

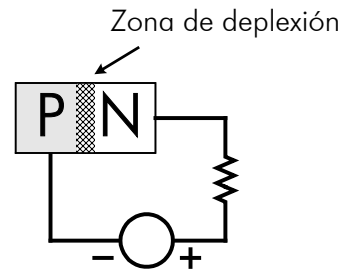
Comenzando con una juntura P-N (P es la base y N es el colector) polarizada inversamente:

El campo eléctrico de la fuente existe a través de la región de deplexión. De esta manera, una vez que el equilibrio se ha establecido, el potencial eléctrico entre el material tipo N y tipo P es igual y opuesto al voltaje de la fuente.



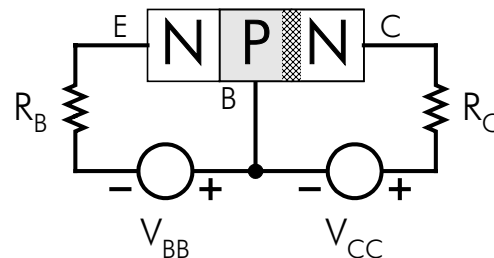
Juntura P-N polarizada inversamente

Solamente los portadores de cargas que se encuentran móviles, originados por la temperatura entre la zona de deplexión, son acelerados por el campo, haciendo que fluya una corriente de fuga en la polarización inversa.

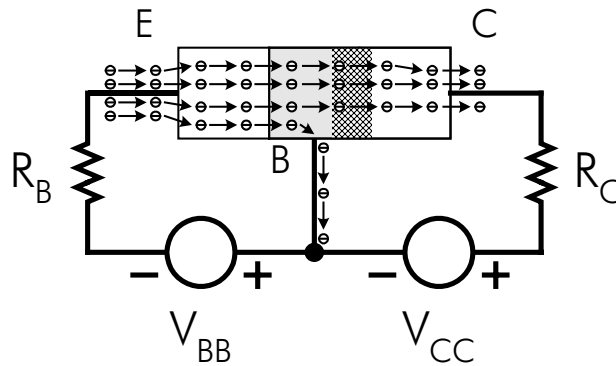


Al crear una unión P-N adicional a la izquierda, añadiendo un material tipo N (emisor) y polarizando directamente la nueva unión, ésta entrará en conducción como un diodo:

La juntura base-emisor conduce polarizada directamente cuando el voltaje V_{BE} es mayor que el voltaje de la barrera formada por la zona de deplexión (≈ 650 mV para el silicio y ≈ 300 mV para el germanio). R_B es la resistencia de base y se incluye con el fin de controlar la corriente de base.



Los electrones provenientes desde el fuertemente dopado emisor, cruzan la unión pero antes que ellos tengan la posibilidad de combinarse con los huecos en la base tipo P y al viajar hasta el terminal positivo de V_{BB} , son recogidos por el fuerte campo que existe alrededor de la unión colector-base, el cual está polarizado inversamente:



Por lo tanto, solamente unos pocos electrones van hacia el positivo de V_{BB} y la mayoría son atraídos a través de la unión colector-base, causando una gran corriente en el colector.

En la figura anterior, se puede observar que según la dirección de las corrientes expuestas, se debe cumplir que la corriente de emisor (I_E) debe ser igual a la suma de las corrientes de base (I_B) y de colector (I_C):

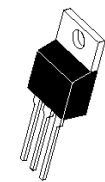
$$I_E = I_B + I_C$$

La dirección indicada por las flechas de la corriente, en la figura anterior, corresponde al sentido electrónico. Para el análisis de circuitos con transistores se usa el sentido convencional.

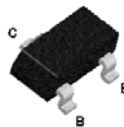
Encapsulados

Existen cientos de diferentes tipos de encapsulados para los transistores. En éstos, el tamaño depende principalmente de la potencia que deben disipar. Para los transistores de baja potencia es muy común el encapsulado TO-92; para mediana potencia es el TO-220 y para los transistores de potencia el TO-3.

A continuación se muestran algunos encapsulados de los más comunes de encontrar en equipos electrónicos:



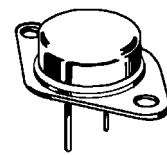
TO-220



SOT-23



TO-92



TO-3

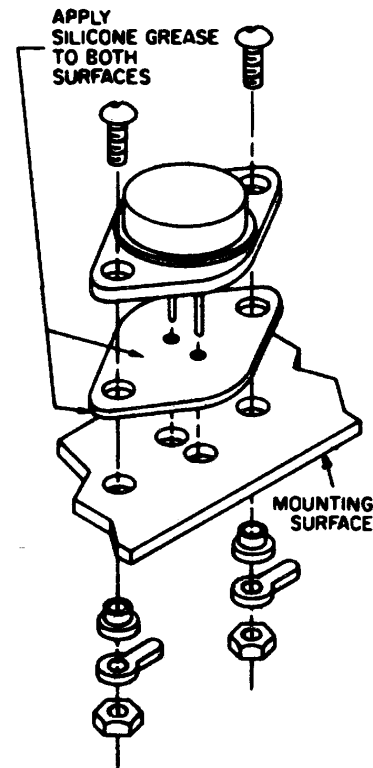
Cabe hacer notar que, normalmente, el electrodo colector está conectado a la parte metálica del encapsulado, por lo que muchas veces es necesario aislar el transistor del disipador de calor, puesto que podrían existir diferencias de potencial entre ambos.

En la mayoría de los casos en que se usan los transistores de potencia, se requiere de un disipador de calor para refrigerar el transistor. Normalmente se usa aluminio en los disipadores ó radiadores de calor. Considerando que el aluminio es un material conductor y que normalmente tiene el mismo potencial que el chasis del equipo donde se encuentra instalado, se debe tener presente aislar el transistor del disipador.

En la figura de la derecha se muestra el detalle del montaje de un encapsulado TO-3 que debe aislarse del disipador:

Para el montaje de transistores en disipadores de calor se debe tener en cuenta:

- El encapsulado debe quedar aislado eléctricamente del disipador y para aislar se usa una película de mica entre el encapsulado y el disipador. También los tornillos deben quedar aislados del disipador mediante arandelas plásticas.
- Entre el encapsulado y el disipador debe existir la menor resistencia térmica posible. Para esta función se debe aplicar una sustancia conductora del calor (silicone grease) en ambas superficies de la mica aisladora.



Potencia disipada por un transistor

Independientemente del circuito en que esté montado un transistor, la potencia disipada (P_D) se puede determinar por la siguiente ecuación:

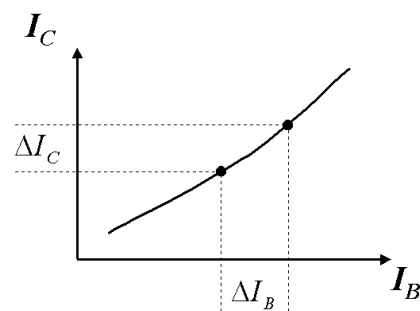
$$P_D = I_C \cdot V_{CE}$$

Ganancia de corriente

En un BJT, existe una proporcionalidad directa entre la corriente de base y la corriente de colector.

Una característica muy importante en un transistor es la relación que existe entre la corriente de colector y la corriente de base, esto se conoce como ganancia de corriente que, para la corriente continua, se simboliza con la letra griega β (beta) ó con las siglas h_{FE} .

La ganancia de corriente es el cociente entre la variación de la corriente de colector y la corriente de base.



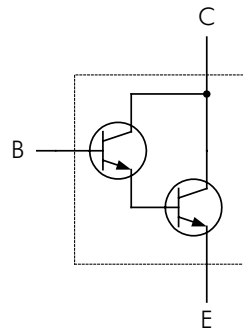
$$h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

La ganancia de corriente es un parámetro adimensional e indica la cantidad de veces es la corriente de colector a la corriente de base. La ganancia de corriente tiene un valor propio en cada serie de transistor y se pueden encontrar valores desde alrededor de 20, en transistores de potencia, y sobre 1.000, en transistores de baja potencia.

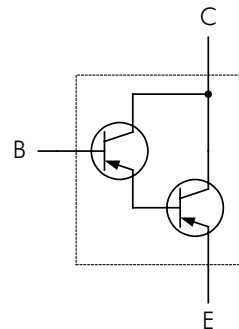
Conexión darlington

Con el fin de aumentar la ganancia de corriente de una etapa, es común conectar dos transistores formando un transistor "darlington". Normalmente se utiliza este en el montaje colector común.

La siguiente figura muestra las formas de conectar dos transistores para formar un transistor darlington:



Darlington NPN



Darlington PNP

Para determinar la ganancia del par darlington podemos comenzar aplicando la Ley de Corrientes de Kirchhoff, en la siguiente figura:

$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_{B2}$$

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_{E1}$$

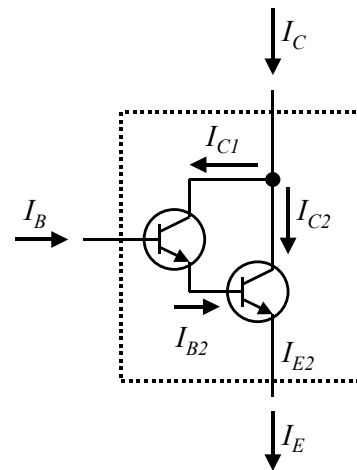
$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot (I_B + I_{C1})$$

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_{C1}$$

$$I_C = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_B + \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot I_B$$

$$I_C = I_B \cdot (\beta_1 + \beta_2 + \beta_2 \cdot \beta_1)$$

$$\frac{I_C}{I_B} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_2 \cdot \beta_1$$



Finalmente:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_2 \cdot \beta_1$$

Como la suma de las ganancias de los transistores es mucho menor que el producto entre ellas, entonces, simplemente, la ganancia de un transistor darlington se describe como:

$$\beta = \beta_2 \cdot \beta_1$$

Un transistor darlington se comporta como si fuese un transistor convencional, con la diferencia que el voltaje base-emisor es el doble (alrededor de 1,3 voltios para un transistor de silicio) y lógicamente, la ganancia de corriente es muy superior.

Existen formas alternativas de conectar dos transistores con el fin de obtener una ganancia similar a la del transistor darlington, este arreglo se denomina pseudodarlington.

Las siguientes figuras muestran como formar un transistor pseudodarlington:



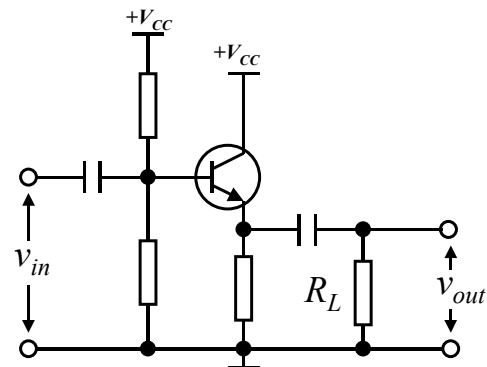
La ganancia de corriente de un par pseudodarlington se considera igual que la de un par darlington.

Montajes de los transistores

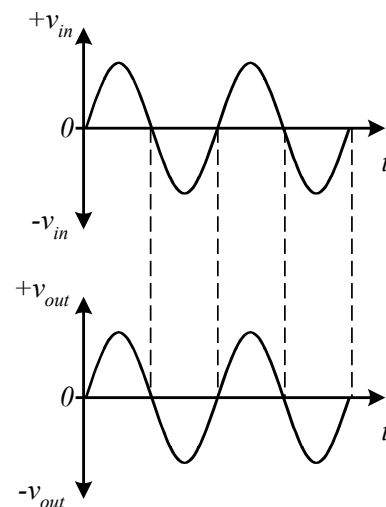
Una señal puede ser amplificada en tensión, corriente o ambas. Dependiendo de la necesidad existen tres montajes básicos para un transistor en un circuito que son:

Colector común

Éste montaje es necesario en circuitos donde la corriente en la carga es de magnitud importante, como por ejemplo en la salida de un amplificador de potencia de audio. Se caracteriza por tener una baja impedancia de salida y una alta impedancia de entrada, con una ganancia de tensión cercana a la unidad.

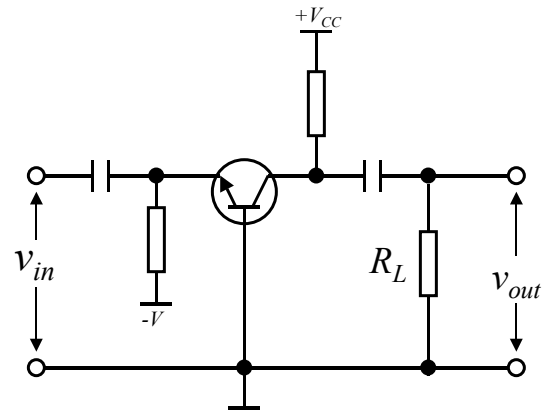


En el siguiente oscilograma se puede observar que la señal de entrada está en fase con la de salida:

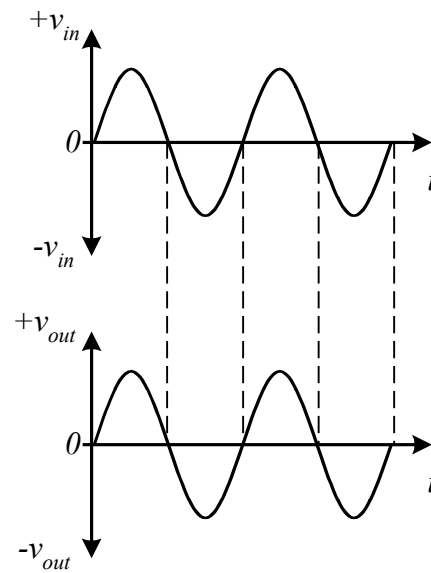


Base común

Se caracteriza por poseer una elevada ganancia de tensión, pero con una alta impedancia de salida. El voltaje de salida está en fase con el voltaje de entrada.



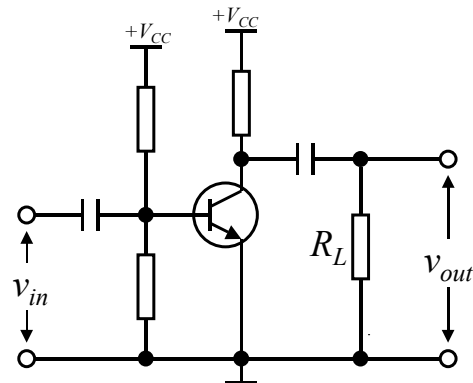
En el siguiente oscilograma se puede observar que la señal de entrada está en fase con la de salida:



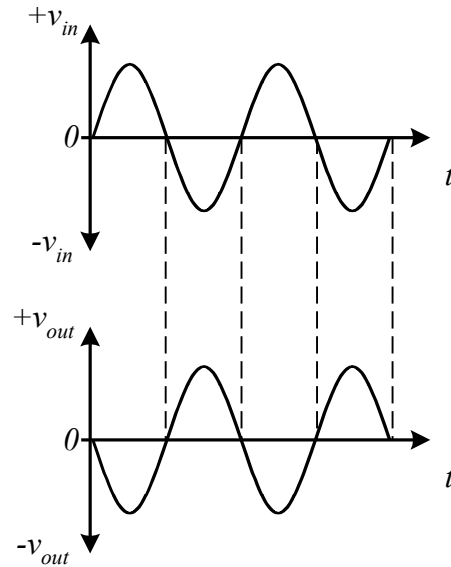
Emisor común

Es, sin duda, la configuración más utilizada debido a que amplifica la tensión como la corriente simultáneamente.

El voltaje de salida está en contrafase con el voltaje de entrada.



En el siguiente oscilograma se puede observar que la señal de entrada está en contrafase con la de salida:



Nótese que en todos los montajes mostrados, para amplificar señales, siempre debe existir polarización directa entre la juntura base-emisor y polarización inversa entre las junturas base-colector.

Características eléctricas de los BJT's

En la mayoría de los manuales de referencia comienzan ofreciendo un resumen de las características más importantes de los transistores. Este apartado se denominan quick reference data (referencia rápida de datos). El primer bloque entrega los valores límites ó absolute maximum ratings. Si los valores límites son sobrepasados, el transistor podría destruirse irreparablemente. Algunos de los valores límites son los siguientes:

V_{CEO} : Voltaje colector-emisor con la base abierta. Es el máximo voltaje colector-emisor al cual se puede someter el transistor cuando la juntura base emisor es un circuito abierto (base open).

V_{CES} : Voltaje colector-emisor con la base en cortocircuito con el emisor. Es el máximo voltaje colector-emisor al cual se puede someter el transistor cuando los terminales base y emisor están unidos por un conductor (base shorting). Normalmente la magnitud de V_{CES} es mayor que V_{CEO} .

V_{CBO} : Voltaje colector-base con la base abierta. La magnitud de V_{CBO} es similar a V_{CEO} y normalmente se consideran iguales.

V_{EB} : Es el máximo voltaje inverso que se puede aplicar a la juntura base-emisor.

I_C : Es la corriente continua máxima que puede circular por el colector permanentemente.

I_{Cmax} : Es el valor de corriente máxima que puede circular por el colector cuando esta no es constante.

Posteriormente el fabricante especifica los parámetros. Como éstos pueden variar de un transistor a otro, aunque sean de la misma serie, se incluyen los valores mínimos típicos y máximos.

I_{CBO} : Corriente de corte de colector. Es la corriente debida a los portadores minoritarios a través del colector con la base abierta.

V_{CEsat} : Es el voltaje mínimo entre colector y emisor que se alcanza bajo la condición de saturación.

V_{BE} : Es la caída de tensión base-emisor cuando la juntura está polarizada directamente.

h_{FE} : Ganancia de corriente en corriente continua (β). Normalmente tiene un gran campo de variación.

h_{fe} : Ganancia de corriente en corriente alterna.

En este grupo de características se suelen incluir además los valores de las capacidades parásitas interelectrónicas y frecuencias de transición, entre otras.

A continuación se presenta una tabla, copiada del manual, correspondiente a las características de un transistor BC-107.

Param	Test conditions	Value			Unit
		Min	Typ	Max	
I_{CBO}	$I_E = 0 \text{ mA}, V_{CB} = 45 \text{ V}$	-	0,15	15	mA
V_{CEsat}	$I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 5 \text{ mA}$	-	0,22	0,6	V
V_{BE}	$I_C = 2 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	-	0,68	-	V
	$I_C = 100 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	-	0,90	-	V
h_{FE}	$I_C = 10 \text{ }\mu\text{A}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	-	90	-	-
	$I_C = 2 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	-	180	-	-
	$I_C = 20 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	-	225	-	-
	$I_C = 100 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	-	210	-	-

Parámetros más relevantes

Los parámetros más importantes a considerar en un diseño o reemplazo de un transistor en un circuito son:

- Corriente máxima de colector ($I_{C\text{máx}}$).
- Ganancia de corriente (h_{FE}).
- Voltaje máximo colector-emisor ($V_{CE\text{máx}}$).
- Potencia máxima de disipación ($P_{D\text{máx}}$), que es la máxima potencia total que puede disipar el transistor sin destruirse.