

# Transistor de Unión Bipolar (BJT)

March 18, 2014

## 1 Introducción

El transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término transistor es la contracción en inglés de transfer resistor (resistencia de transferencia). Actualmente se encuentran prácticamente en todos los aparatos electrónicos de uso diario: radios, televisores, reproductores de audio y video, relojes de cuarzo, computadoras, lámparas fluorescentes, tomógrafos, teléfonos celulares, etc.

El transistor bipolar fue inventado en los Laboratorios Bell de EE. UU. en diciembre de 1947 por John Bardeen, Walter Houser Brattain y William Bradford Shockley, quienes fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1956. Fue el sustituto de la válvula termoiónica de tres electrodos, o triodo.

El transistor de efecto de campo fue descubierto antes que el transistor (1930), pero no se encontró una aplicación útil ni se disponía de la tecnología necesaria para fabricarlos masivamente. Es por ello que al principio se usaron transistores bipolares y luego los denominados transistores de efecto de campo ([FET]). En los últimos, la corriente entre el surtidor o fuente (source) y el drenaje (drain) se controla mediante el campo eléctrico establecido en el canal. Por último, apareció el MOSFET (transistor FET de tipo Metal-Óxido-Semiconductor). Los MOSFET permitieron un diseño extremadamente compacto, necesario para los circuitos altamente integrados (CI).

Hoy la mayoría de los circuitos se construyen con tecnología CMOS. La tecnología CMOS (Complementary MOS ó MOS Complementario) es un diseño con dos diferentes MOSFET (MOSFET de canal n y p), que se complementan mutuamente y consumen muy poca corriente en un funcionamiento sin carga.

### 1.1 Triodo

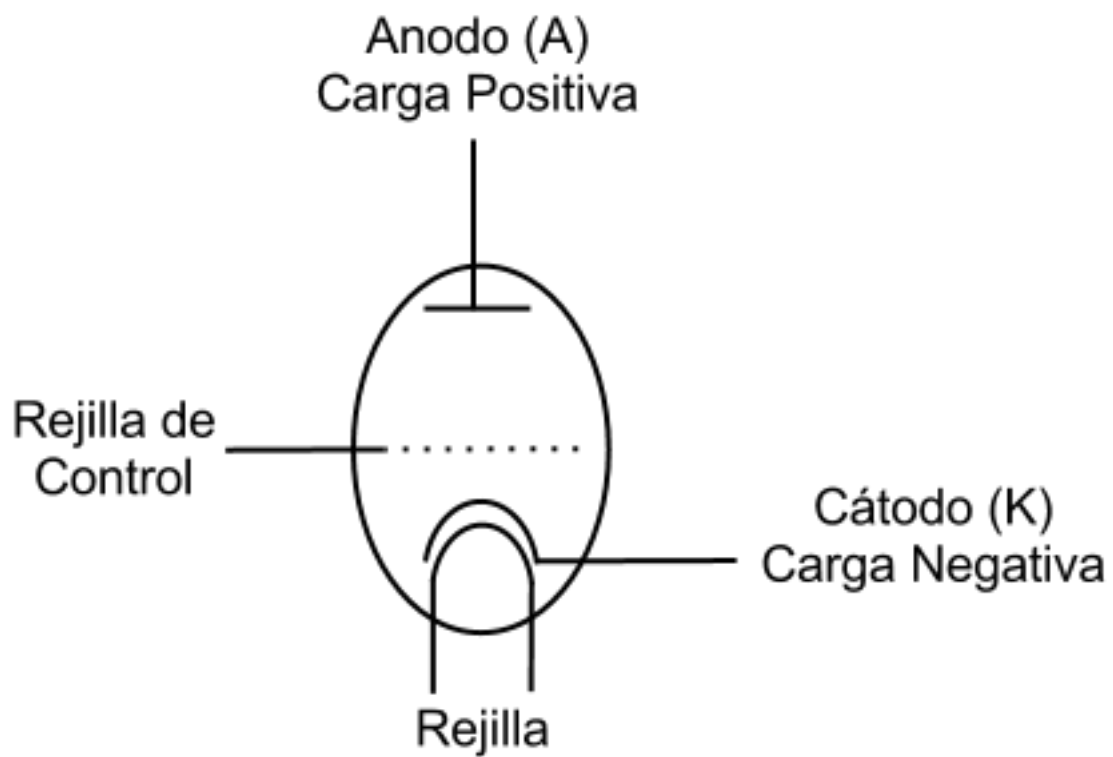
Se denomina triodo a la válvula termoiónica de tres electrodos, ánodo, cátodo y rejilla de control.

La tensión aplicada a la rejilla hace que el flujo de electrones desde el cátodo al ánodo sea mayor o menor. Esto es muy interesante pues aplicando una señal de muy débil intensidad entre cátodo y rejilla podemos conseguir que la variación del flujo de electrones entre éste y el ánodo sea muy grande. Es decir, con una pequeña tensión controlamos una gran corriente. A ese fenómeno se le llama amplificación. Por eso, el triodo es un amplificador.

### 1.2 Estructura básica.

El transistor consta de un sustrato (usualmente silicio) y tres partes dopadas artificialmente (contaminadas con materiales específicos en cantidades específicas) que forman dos uniones bipolares, el emisor que emite portadores, el colector que los recibe o recolecta y la tercera, que está intercalada entre las dos primeras, modula el paso de dichos portadores (base).

A diferencia de las válvulas, el transistor es un dispositivo controlado por corriente y del que se obtiene corriente amplificada. En el diseño de circuitos a los transistores se les considera un elemento activo, a diferencia de los resistores, condensadores e inductores que son elementos pasivos. “Su funcionamiento sólo puede explicarse mediante mecánica cuántica.” De manera simplificada, la corriente que circula por el colector es función amplificada de la que se inyecta en el emisor, pero el transistor sólo gradúa la corriente que circula a través de sí mismo, si desde una fuente de corriente continua se alimenta la base para que circule la carga



*Triodo*

Figure 1: Triodo

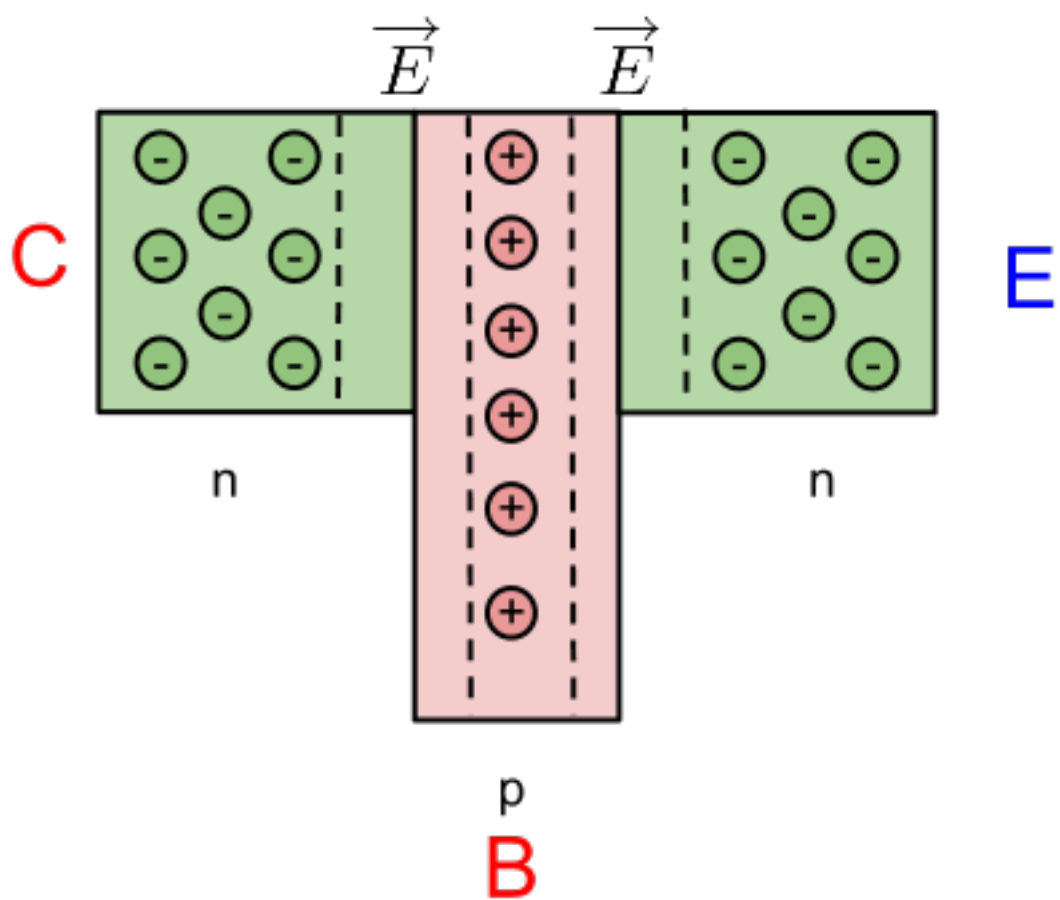


Figure 2: Estructura básica del BJT

por el colector, según el tipo de circuito que se utilice. El factor de amplificación o ganancia logrado entre corriente de colector y corriente de base, se denomina "Beta del transistor".

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \quad (1)$$

Otros parámetros a tener en cuenta y que son particulares de cada tipo de transistor son:

- Tensiones de ruptura de Colector Emisor.
- Tensiones de ruptura de Base Emisor.
- Tensiones de ruptura de Colector Base.
- Potencia Máxima, disipación de calor.
- Frecuencia de trabajo.

Además, de varias tablas donde se grafican los distintos parámetros tales como corriente de base, tensión Colector Emisor, tensión Base Emisor, corriente de Emisor, etc. Los tres tipos de esquemas (configuraciones) básicos para utilización analógica de los transistores son:

- Emisor común.
- Colector común.
- Base común.

### 1.3 Funcionamiento

En una configuración normal, la unión emisor-base se polariza en directa y la unión base-colector en inversa. Debido a la agitación térmica los portadores de carga del emisor pueden atravesar la barrera de potencial emisor-base y llegar a la base. A su vez, prácticamente todos los portadores que llegaron son impulsados por el campo eléctrico que existe entre la base y el colector.

Un transistor NPN puede ser considerado como dos diodos con la región del ánodo compartida.

En una operación típica, la unión base-emisor está polarizada en directa y la unión base-colector está polarizada en inversa. En un transistor NPN, por ejemplo, cuando una tensión positiva es aplicada en la unión base-emisor, el equilibrio entre los portadores generados térmicamente y el campo eléctrico repelente de la región agotada se desbalancea, permitiendo a los electrones excitados térmicamente inyectarse en la región de la base. Estos electrones "vagan" a través de la base, desde la región de alta concentración cercana al emisor hasta la región de baja concentración cercana al colector. Estos electrones en la base son llamados portadores minoritarios debido a que la base está dopada con material P, los cuales generan "huecos" como portadores mayoritarios en la base.

Utilizando la ley de Kirchhoff se tiene que;

$$i_e = i_c + i_b, \quad (2)$$

sustituyendo (1) en (2) se tiene que

$$i_b = \frac{i_e}{\beta + 1} \quad (3)$$

y

$$i_c = i_e \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (4)$$

La región de la base en un transistor debe ser constructivamente delgada, para que los portadores puedan difundirse a través de esta en mucho menos tiempo que la vida útil del portador minoritario del semiconductor, para minimizar el porcentaje de portadores que se recombinan antes de alcanzar la unión base-colector. El espesor de la base debe ser menor al ancho de difusión de los electrones.

## 1.4 Curvas Características

## 2 Circuito con un Transistor BJT

---

Este es un circuito básico dentro del estudio de amplificadores con un transistor con la teoría de amplificadores de baja potencia y baja frecuencia.

Una de sus principales características es la que se conoce como **Insensibilidad a variaciones de la  $\beta$** , la cual permite que el comportamiento del circuito no varíe significativamente ante pequeñas variaciones de la  $\beta$ . Sin embargo, para lograr esto se requiere cumplir ciertas condiciones que dificultan el diseño del circuito.

El esquema del circuito se muestra en la siguiente figura

De forma general se puede considerar que el valor de los capacitores de acople es muy grande (idealmente  $X_c \rightarrow \infty$ ) de forma tal que la impedancia del capacitor  $X_c$  es:

$$X_c = \begin{cases} \infty & w = 0 \\ 0 & w \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

De la expresión (5), entonces podemos concluir que la energía proporcionada por la fuente de DC se encuentra contenida únicamente en la parte del circuito relacionado con el transistor. Por lo tanto es posible analizar el circuito considerando primero la fuente de DC y luego agregar los efectos de la fuente de AC de forma similar al teorema de superposición de fuentes, con la diferencia que al analizar el efecto de la fuente de AC se considera que el transistor mantiene el efecto de la fuente de DC llamado punto de operación  $Q$ .

### 2.1 Analisis de DC

---

El circuito más simple con un transistor es el que se muestra en la siguiente figura

Al analizar el circuito anterior por medio del análisis de mallas, se tiene que:

de este circuito se obtienen para la malla 1 la expresión (6):

$$V_{cc} = V_{R_c} + V_{ce} \quad (6)$$

del malla 2 se obtiene la expresión (7)

$$V_{cc} = V_{R_b} + V_{be} \quad (7)$$

Si suponemos que el transistor se encuentra en la región lineal entonces se tiene que:

$$\begin{aligned} i_c &= \beta i_b \\ i_e &= i_c + i_b \\ i_e &= \alpha i_c \\ \alpha &= \frac{\beta}{\beta + 1} \end{aligned}$$

Considerando la **ley de Ohm** en la expresión (6) se tiene que:

$$V_{cc} = i_{R_c} R_c + V_{ce} \quad (8)$$

dado que la resistencia  $R_c$  está en serie con el transistor, entonces se puede considerar que  $i_c = i_{R_c}$ , por lo que la expresión (12) se puede reescribir como:

$$V_{cc} = i_c R_c + V_{ce} \quad (9)$$

En la expresión (13) se tiene que  $i_c$  y  $V_{ce}$  son parámetros del transistor y por lo tanto se consideran incógnitas, lo cual lleva a que no se puede encontrar una solución única. Utilizando un análisis similar en la expresión (7) se tiene que:

$$V_{cc} = i_b R_b + V_{be} \quad (10)$$

En la expresión (14) se tiene que idénticamente en un transistor de silicio  $V_{be} = 0.7$ , por lo que se tiene que:

$$i_b = \frac{V_{cc} + V_{be}}{R_b} \quad (11)$$

De la expresión (15) se observa que el valor de la corriente  $i_b$  es determinado por elementos externos al transistor ( $V_{cc}$  y  $R_b$ ). Además, si se considera la expresión (8) en (13) entonces se tiene que el valor de  $i_c$  y de  $V_{ce}$  se determinan por los elementos externos al transistor.

Si los elementos externos determinan los posibles valores de los parámetros del transistor ( $i_b, i_c$  y  $V_{ce}$ ) entonces, sin importar el valor de  $\beta$  se puede representar gráficamente cualquier posible valor de  $i_c$  y  $V_{ce}$  utilizando la expresión (13), se tiene que el máximo valor de  $i_c$  se obtiene cuando  $V_{ce} = 0$  y su expresión es:

$$i_c = \frac{V_{cc}}{R_c} \quad (12)$$

el valor máximo de  $V_{ce}$  se obtiene cuando  $i_c = 0$  y su expresión es:

$$V_{ce} = V_{cc} \quad (13)$$

De las expresiones (13), (16) y (17) se puede concluir que un incremento en  $i_c$  o  $V_{ce}$  involucra un decremento en  $V_{ce}$  o  $i_c$  respectivamente. Dado que el transistor trabaja en el primer cuadrante de la gráfica IV, entonces todo posible valor de  $i_c$  y  $V_{ce}$  se puede representar a través de la siguiente gráfica

La recta en la figura anterior es conocida como **Recta de Carga**, la cual se puede definir como: **La representación gráfica de todos los posibles valores de  $i_c$  y  $V_{ce}$ .** La Recta de carga, junto con las curvas características del transistor nos permiten determinar el comportamiento del circuito, al poder determinar si en que región de funcionamiento se encuentra el transistor, es importante recordar una de las hipótesis en el análisis es considerar que el transistor se encuentra en la región lineal.

Aunque la Recta de Carga representa todos los posibles valores de  $i_c$  y  $V_{ce}$ , en la práctica se tiene que  $i_c$  y  $V_{ce}$  tienen un valor único, debido a que todos los elementos en el circuito se considera que tienen un valor constante, a ese valor específico de  $i_c$  y  $V_{ce}$  debido a los valores del circuito se le llama **Punto de Operación**.

Dadas las expresiones (8) y (13) se puede considerar que  $V_{ce}$  es una señal de AC con un componente de DC (una señal de AC con un offset) considerar que  $i_c$  y  $V_{ce}$ . El punto de operación cuando la señal de AC es nula corresponde al componente de DC, y se llama **punto de reposo** se denota con la letra  $Q$ . En la siguiente figura se presenta un bosquejo de la evolución en tiempo de  $V_{ce}$ .

La amplitud de la señal  $V_{ce}$  está limitado por la expresión (17) y la naturaleza del transistor que requiere que  $V_{ce} \geq 0$  por lo que se tiene que:

$$0 \leq V_{ce}(AC) \leq V_{cc} \quad (14)$$

Dado que el comportamiento de  $V_{ce}$  está relacionado con  $i_c$  por la expresión  $i_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_c}$ , entonces se concluye que  $i_c$  presente un comportamiento similar a  $V_{ce}$  pero de forma inversa, cuando  $V_{ce}$  aumenta  $i_c$  disminuye. Si consideramos el comportamiento de AC sobre la recta de carga, se tendrá que el punto de reposo es el origen del sistema de AC. Además que los límites del comportamiento de AC por la expresión (18) y de forma similar  $i_c$  por:

$$0 \leq i_c(AC) \leq \frac{V_{cc}}{R_c} \quad (15)$$

graficamente se representa en la siguiente figura

$$V_{R_C} + V_{C_E} + V_{R_E} = V_{T_H} = V_{R_i} + V_{B_E} + V_{R_E} \quad (16)$$

(16)