

Práctica 8: transistores

Laboratorio 3 - Departamento de Física - FCEyN - UBA

por Nicolas Torasso y Gabriela Pasquini

(1c 2023)

1. Transistores

1.1. Transistores de juntura bipolar

El **transistor** es el componente fundamental de la mayor parte de los circuitos no pasivos que se utilizan en electrónica. En particular, los circuitos integrados están contruidos a partir de transistores, desde unos pocos como en los amplificadores operacionales hasta millones de ellos como en un microprocesador como el del celular o la PC. Hay más de un tipo de transistor, pero acá solo nos referiremos al llamado Transistor de Juntura Bipolar (BJT en inglés), que se usa fundamentalmente para aplicaciones analógicas y se inventó en los Laboratorios Bell a fines de la década del 40. **Un transistor bipolar es un dispositivo de tres terminales en el que una pequeña corriente aplicada a la base controla una corriente mucho mayor que fluye entre el colector y el emisor.**

Los **transistores BJT** se construyen a partir de tres capas de material semiconductor dopadas, llamadas *Emisor* (E), *Base* (B) y *Colector* (C), en ese orden y cada una conectada a una de las tres terminales del transistor. La base es una capa más delgada que se dopa de forma que tenga un exceso de portadores de signo opuesto al de las otras dos, dando lugar a dos clases de transistores BJT: NPN y PNP, las cuales tienen la base dopada P y N, respectivamente (ver Figura 1). En ambos casos, las dos junturas PN (o NP) entre la Base y el Emisor (BE) y entre la base y el colector (BC) pueden pensarse como dos diodos (ver Figura 1). Recordemos que cada juntura tiene carga neta cero, pero cuando se polariza adecuadamente, los huecos de la capa p saltan a la capa n y los electrones de la capa n saltan a la capa p, generando cargas libres en ambas capas que permiten la circulación de corriente a través de la juntura.

Vamos a concentrarnos en aspectos prácticos y “macroscópicos” de estos componentes. La Figura 2 muestra el sentido de las corrientes en ambos tipos de transistores cuando la juntura BE está correctamente polarizada. En un transistor NPN, cuando la juntura PN entre la base y el emisor se polariza en forma directa, circula una corriente desde la base y hacia afuera del emisor, porque este

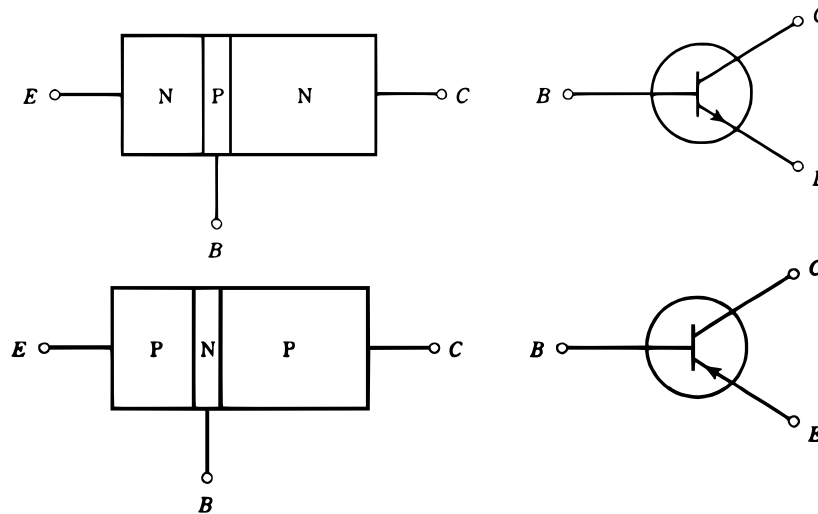


Figura 1: Esquema de los transistores de juntura NPN (arriba) y PNP (abajo), junto con su representación en electrónica.

par de terminales funcionan como un diodo semiconductor. Entonces, la caída de voltaje entre la base y el emisor es la típica de un diodo (0,6 – 0,7 V si es de silicio, la mayoría de ellos lo son).

Si el voltaje sobre el colector está por encima del la base, casi todos los portadores de carga del emisor (que son muchos, pues está fuertemente dopado en comparación con B y C) que entran a la base “siguen de largo” y van hacia el colector, gracias a la geometría de la base. Este es el principio básico del funcionamiento de los transistores de juntura: la polarización de la juntura BE permite que circule corriente desde el Colector al Emisor.

Este flujo de portadores desde el emisor es lo que forma la corriente que fluye a través del terminal emisor (I_E). Solo una pequeña fracción de estos portadores se recombina en la base y forma la corriente del terminal de base (I_B), la cual típicamente es mucho menor que I_E , mientras que el resto (la mayor parte) pasa a través de la base del componente y entra al colector, determinando la corriente del colector (I_C). En el caso de un transistor PNP el sentido de las corrientes se invierte (ver Figura 2). En ambos casos, **siempre que el transistor se polarice en directa**, se cumplen las siguientes relaciones entre los módulos de las corrientes: $I_E \sim I_C$ y $I_E = \beta I_B$, con $\beta \gg 1$.

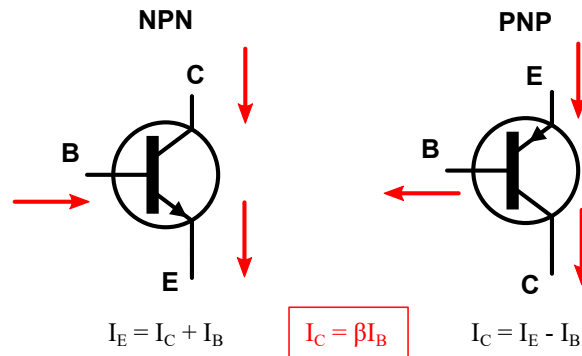


Figura 2: sentido de las corrientes y relación entre ellas en polarización directa de transistores NPN y PNP.

Si la juntura BE **no se polariza en forma directa**, entonces no se genera un flujo grande de portadores desde el emisor y la corriente entre el colector emisor se anula. Las únicas corrientes que quedan son corrientes inversas desde el emisor y el colector hacia la base.

En este sentido, se puede pensar al transistor como una válvula, que a partir del ajuste de la corriente de base permite controlar casi linealmente la corriente del colector. O de otra forma, como un amplificador de corriente: si la juntura base-emisor se polariza directamente (la base unos 0,7 V más positiva que el emisor, para un NPN), entonces una corriente pequeña sobre el terminal de la base estimula una corriente mucho más grande en el terminal del colector. Esto siempre y cuando exista una fuente externa capaz de mantener o suministrar esa corriente.

1.2. Notación

Algunos términos típicos de los libros de electrónicas usan un lenguaje que no se encuentra en los libros de física. Los circuitos tampoco se esquematizan de la misma manera. Acá va una breve ayuda:

- Cuando hablamos de la "polarización" de un transistor, o de un circuito en general con dos terminales, nos referimos a cómo están conectadas las terminales (+) y (-) de su alimentación en continua: dónde está conectada la terminal (+) y dónde la terminal (-).
- Un transistor polarizado en configuración de *emisor común* tiene el emisor conectado a tierra (o a la referencia del circuito, no necesariamente la tierra real). Uno en configuración de *colector común* tiene el colector a tierra, etc.
- La manera de graficar circuitos en electrónica es distinta a la que vinimos usando hasta ahora. La Figura 3 ilustra cómo pasar de una a otra, en un típico circuito con polarización de emisor común:

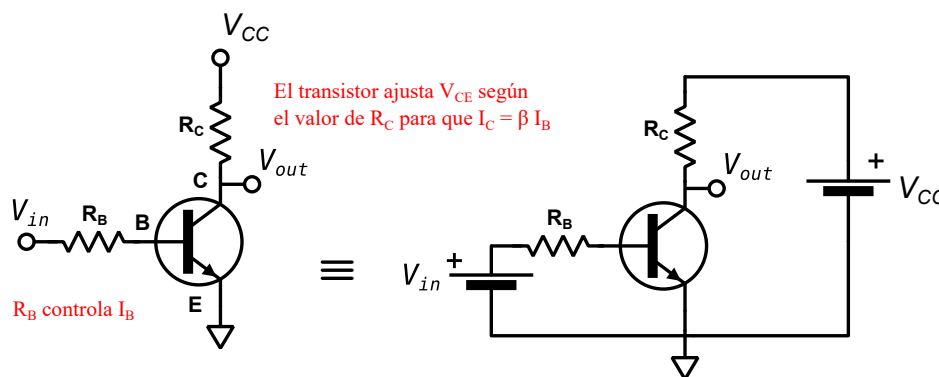


Figura 3: Circuito amplificador en la configuración de emisor común en la representación usada típicamente en electrónica, junto con la representación del circuito equivalente, usando mallas.

En esa figura, la notación V_{CC} refiere al voltaje del colector respecto de tierra (V_{EE} sería el emisor respecto de tierra, etc), y V_{CE} es la tensión entre el colector y el emisor (V_{BE} sería entre la base y el emisor, etc).

2. Curvas características de transistores de juntura

El comportamiento descrito en la Sección 1.1 se muestra en las curvas de la Figura 4, para dos transistores distintos tipo NPN. Las curvas características muestran la corriente de colector I_C en función de la diferencia de potencial entre el colector y el emisor (V_{CE}), para distintos valores de corriente de base I_B (en cada curva aumenta de a $5 \mu\text{A}$). Las curvas son casi planas para $V_{CE} > 0.8 \text{ V}$, lo que muestra que en ese régimen el transistor ajusta el valor de V_{CE} para que la corriente del colector solo dependa de la corriente de base. Además, la separación entre las curvas es constante, lo que muestra una dependencia directa y lineal entre la corriente de colector y la corriente de base. La proporción entre I_C e I_B define la ganancia en corriente del transistor, que generalmente se la denomina β y/o h_{FE} . Valores típicos de β están entre 50 y 200 para la mayoría de los transistores BJT. Es importante destacar que el valor de β es dependiente de la temperatura y de cada transistor, con lo cual se suelen armar circuitos cuyo funcionamiento no dependa críticamente del valor de β .

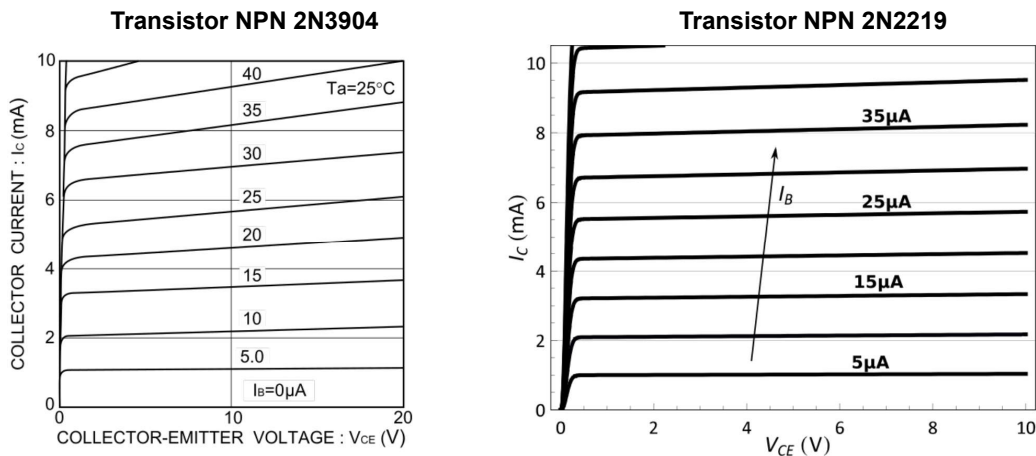


Figura 4: Curvas características de dos transistores NPN.

Las curvas de la Figura 4 pueden obtenerse experimentalmente a partir de un circuito como el de la Figura 3. Las caídas de tensión entre las terminales del transistor se pueden tratar usando la Ley de Mallas, de modo que:

$$V_{in} = V_{BE} + I_B R_B \quad (1)$$

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C R_C \quad (2)$$

Para obtener la curva característica, un voltímetro permite medir directamente la caída de tensión sobre R_B para calcular I_B . Tanto la corriente del colector I_C como la tensión V_{CE} se pueden medir con dos multímetros. En el caso de I_C , se puede obtener conociendo el valor de R_C . La curva característica correspondiente a cada corriente de base se puede obtener variando R_C . El valor de I_B puede regularse cambiando R_B o V_{in} .

Ahora bien: solamente cuando el transistor está correctamente polarizado en directa tendremos un "buen funcionamiento", con un valor de β aproximadamente constante, tal que $I_C \sim \beta I_B$. En este

caso, vale además:

$$V_{BE} \sim 0,7 \text{ V} \quad (3)$$

¿Cómo hacer que esto funcione correctamente?

1. La corriente del colector y la resistencia del colector tienen que ser suficientemente chicos, como para que $I_C R_C < V_{CC}$.
2. Teniendo en cuenta que $I_C \sim \beta I_B$, debe elegirse una R_B compatible.

Por ejemplo, con valores típicos de $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $V_{in} = 5 \text{ V}$ y $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, I_C no debería superar 1 mA, y por lo tanto, con un $\beta \sim 200$ I_B no podría superar $50 \mu\text{A}$.

3. Ejemplo de aplicación: transistor como adaptador de impedancias o *driver*

Podemos dimensionar la importancia de los transistores con el siguiente ejemplo: supongan que tienen una bobina para generar un campo magnético intenso, de modo que requiere corrientes del orden de 1 A. En continua se puede utilizar las fuentes de tensión, pero si en un experimento se necesita variar el campo rápidamente y con una geometría y frecuencia particulares (por ejemplo, una rampa de 455 Hz), el generador de funciones de por sí solo no será útil porque no puede entregar más de aproximadamente 100 mA (debido a que su electrónica no lo permite, motivo por el cual tiene una impedancia de salida de 50Ω). Consideremos entonces el circuito de la Figura 5.

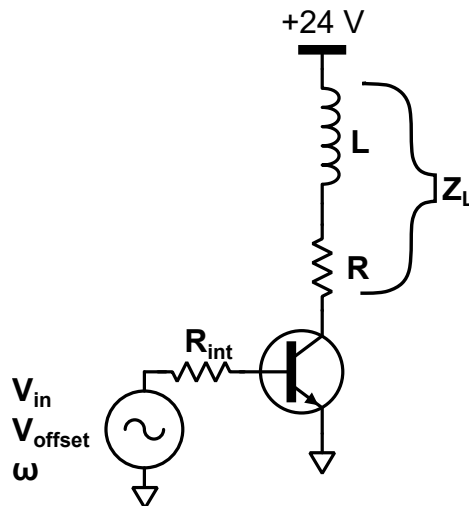


Figura 5: Circuito para controlar corrientes elevadas usando un generador de funciones.

En la condición de polarización en directa de la juntura BE, la corriente del colector que circula por

la bobina de inductancia L y resistencia R cumple $I_C \sim \beta I_B$ y también vale que:

$$I_B = \frac{V_{in} - 0,7 \text{ V}}{R_B} \quad (4)$$

Claro que el límite para I_C está dado por la fuente y por la capacidad del transistor de reducir V_{CE} , cuyo valor mínimo ronda los 0.7 V (ver Figura 4), con lo cual se tiene que:

$$I_C Z_L + V_{CE} < 12 \text{ V} \quad (5)$$

y:

$$I_C < \frac{24 \text{ V} - V_{CE}^{min}}{Z_L} \quad (6)$$

Noten que la fuente de 24 V puede tener (y en general, tienen) una impedancia de salida mucho menor que el generador de funciones, lo cual le permite entregar más corriente. De hecho, una condición que debe cumplir la fuente de 24 V es que sea de al menos una potencia $P \geq I_C \times 24 \text{ V}$. Otra limitación importante del circuito controlador de la Figura 5 es que no permite revertir la dirección del campo magnético, ya que tensiones negativas (de hecho, menores a $\sim 0.7 \text{ V}$) no llegan a polarizar la base. La propuesta es que armen este circuito y comprueben su funcionalidad y sus limitaciones. ¿Por qué sería útil agregar un offset a la señal del generador?

Los y las estudiantes que cursen el Laboratorio de Electrónica (LE) podrán estudiar con más detalle circuitos con transistores y alguno de sus usos en circuitos integrados. De hecho, parte de los contenidos de esta guía fueron adaptados de la práctica de transistores de LE. Aquellos y aquellas interesados en profundizar en el tema pueden consultar el material las referencias [3, 2, 1].

Bibliografía

- [1] Stan Gibilisco and Simon Monk. *Teach Yourself: Electricity and Electronics*. Mc Graw-Hill, Columbus, OH, 6 edition, October 2016.
- [2] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, Columbus, OH, 3 edition, October 2015.
- [3] Frank Rice. *Introductory Electronics Laboratory*. Caltech University, 2019.