

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.
Autor: Dr. David Lara Alabazares

Unidad 4

Transistor BJT y Aplicaciones

Competencias a desarrollar	
Describir el funcionamiento y aplicaciones de los transistores.	Construir y diseñar circuitos electrónicos utilizando el transistor.
Actividades de aprendizaje	
- Diferenciar los tipos de uniones de NP de los transistores. - Describir los modos de operación del transistor al aplicar diferentes polarizaciones.	- Buscar y seleccionar la información en la hoja de datos del fabricante. - Validar la operación del transistor como dispositivo. - Aplicar el transistor como interruptor para accionar CA.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

4.1 Introducción

Como ya se ha visto, el diodo es un dispositivo de una unión PN y este conduce en un solo sentido. El dispositivo que se estudiará en este capítulo es el transistor, el cual está formado de dos uniones PN de las dos siguientes maneras posibles:

1. Una capa de semiconductor tipo N entre dos capas tipo P en forma de emparedado dando como resultado el transistor PNP.
2. Una capa de semiconductor tipo P entre dos capas de semiconductor tipo N en forma de emparedado, originando el transistor NPN.

Por lo tanto, El **BJT** (transistor de unión bipolar) se construye con tres regiones semiconductoras separadas por dos uniones PN. Las tres regiones se llaman emisor, base y colector. En la figura 4-1 (a) y (b) se muestran representaciones físicas de los dos tipos de **BJT**. El término bipolar se refiere al uso tanto de huecos como de electrones como portadores de corriente en la estructura de transistor.

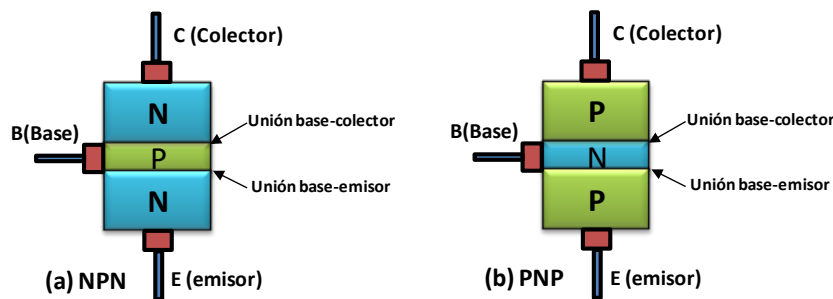


Figura 4.1 El transistor BJT

La unión PN que forma la región entre la base y el emisor se llama unión base-emisor. La unión PN que forma la región entre la base y el colector se le llama unión base-colector. Cada región tiene un conductor conectado. Estos conductores se designan por las letras E, B y C que representan el emisor, la base y el colector, respectivamente. La región de la base está ligeramente dopada y es muy delgada en comparación con las regiones del emisor, excesivamente dopada, y la del colector, moderadamente dopada.

El transistor fue inventado en 1948 por Shockley, Bardeen y Brattain, de los laboratorios Bell, y desde entonces ha revolucionado por completo el campo de la electrónica y muchos campos afines.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

4.2 Teoría de operación

Para entender la operación de un transistor, analizaremos el interior de la estructura NPN cuando se polariza tal como se muestra en la figura 4.2. El emisor constituido de material tipo N está excesivamente dopado, por lo tanto, tiene una densidad muy alta de los electrones en su banda de conducción. La unión BE está polarizada en directa y por lo tanto los electrones libres del emisor se difunden con facilidad a través de la unión hacia la región de la base de tipo P muy delgada y levemente dopada. La base tiene una baja densidad de huecos, los cuales son los portadores mayoritarios, representados por los círculos blancos positivos.

Por un lado, de los electrones que entran a la base, una pequeña parte se recombinan con huecos, generando una corriente de huecos dirigida hacia el emisor. Estos electrones finalmente abandonan la base hacia la terminal de esta, formando una pequeña corriente conocida como corriente de base. Por otro lado, la mayoría de los electrones libres que entraron a la base no se recombinan con huecos porque es muy delgada. Estos electrones son atraídos hacia el colector de la unión BC, que tiene una polarización en inversa, debido al voltaje de alimentación positivo aplicado al colector.

Por lo tanto, se produce un flujo de electrones libres que se desplazan a través del colector hacia la batería y de la batería hacia el emisor. Este flujo junto con la corriente de base, forman la corriente de emisor. La corriente de emisor es ligeramente más grande que la corriente de colector debido a la pequeña corriente de base que se produce en la unión BE polarizada en directa.

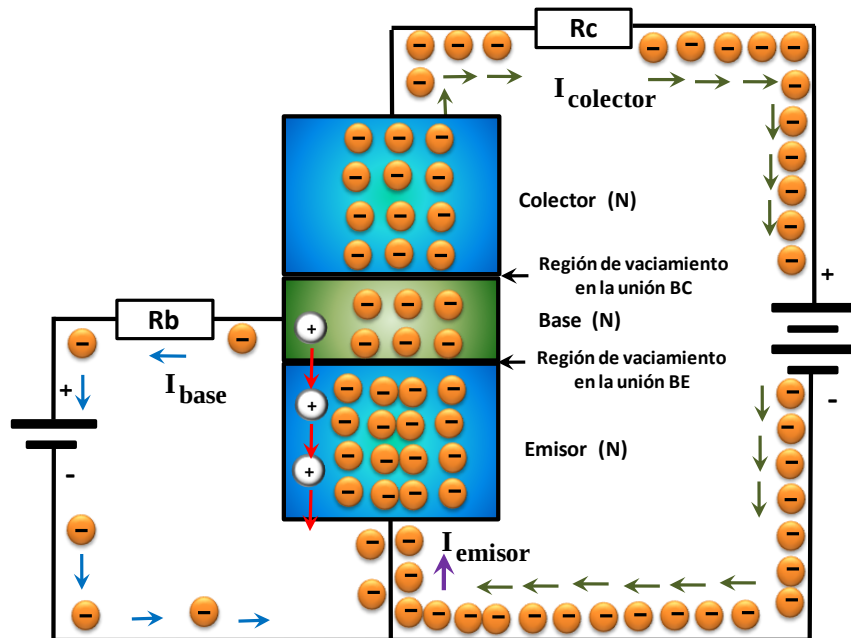


Figura 4.2 Operación del transistor BJT

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA**Carrera:** Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.**Autor:** Dr. David Lara Alabazares

4.3 Polarización del transistor

Considérese un transistor típico de unión NPN polarizado, como se muestra en la figura 4.3. La sección inferior llamada emisor se hace con un semiconductor tipo N muy contaminado de impurezas. La sección central, denominada base, está formada por una capa muy delgada de semiconductor tipo P ligeramente contaminada. La sección superior, denominada colector está hecha de material semiconductor tipo N medianamente contaminado. Por lo tanto el emisor y la base forman una unión NP, y la base y el colector una PN.

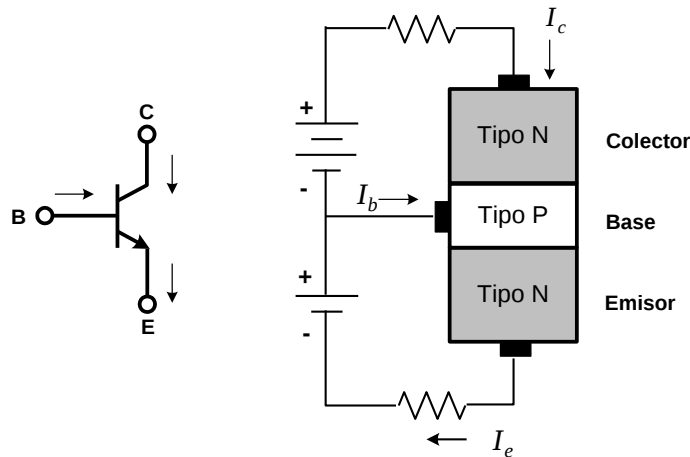


Figura 4.3 Transistor NPN y su símbolo,

La unión emisor-base NP en la figura 4.3, está polarizada directamente y permite que los electrones fluyan con facilidad de la región N al lado P. La región de la base es muy delgada y contiene relativamente pocos huecos permitiendo que la mayor parte de los electrones se difundan hacia el colector, pero algunos de los electrones son atrapados en los huecos de la base. Si estos no se retiran de la base, la carga negativa de los electrones atrapados repelerá a los electrones del emisor y la corriente cesará rápidamente del emisor al colector. Al desplazar o dejar los electrones de la base el transistor puede emplearse como un interruptor. Cuando los electrones se retiran de la base se produce una corriente de electrones que proviene de aquella. La corriente del emisor I_e se divide en la corriente de la base I_b y la corriente del colector I_c , es decir:

$$I_e = I_b + I_c \quad (4.1)$$

La razón de la corriente del colector a la corriente del emisor se llama α (alfa)

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} \quad (4.2)$$

El fabricante suministra este número como especificación para cada transistor. Puesto que del 95 al 99% de los electrones del emisor viajan a través de la base y llegan al colector sin ser atrapados, el valor de α se da entre 0.95 y 0.99. Si se conoce α puede calcularse la relación de la corriente muy pequeña de la base a

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

la corriente del emisor. Si se emplea la ecuación (4.1) puede determinar la corriente de base en función de las corrientes de colector y emisor como sigue:

$$I_b = I_e - I_c \quad (4.3)$$

de la ecuación (4.2) se deduce que $I_c = \alpha I_e$ que al sustituir en (4.3) da

$$I_b = I_e - \alpha I_e \quad (4.4)$$

Factorizando se obtiene una expresión para la corriente de la base del transistor:

$$I_b = I_e(1 - \alpha) \quad (4.5)$$

En el transistor PNP el material N se encuentra entre las dos regiones de material tipo P. Debido a esta inversión de las posiciones de los dos tipos de material, los portadores de corriente primaria en este transistor son huecos en lugar de electrones. Puesto que los huecos son realmente cargas positivas, necesariamente tienen que invertirse las polarizaciones. Para que la polarización del emisor sea directa el voltaje del emisor debe ser positivo con respecto a la base, y para que la unión del colector este en polarización inversa, el colector debe ser negativo con respecto a la base. La polarización para un transistor PNP se muestra en la figura 4.4. El cambio en las polarizaciones no afecta la forma en que las uniones operan, pues esta solo acomoda el reacomodo de los materiales y sus propiedades. En funcionamiento, una parte de los huecos fluyen de la unión del emisor a la base y la mayor parte hacia el colector.

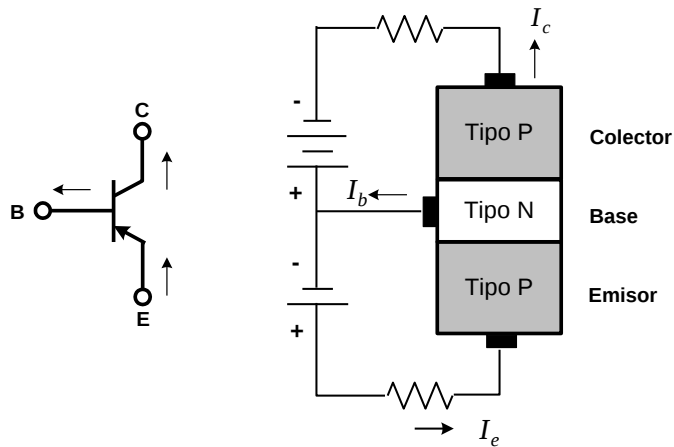


Figura 4.4. Transistor PNP y su símbolo

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

4.4 Modos de operación

El transistor tiene varios modos de funcionamiento según la forma en que se aplique el voltaje entre sus terminales. Sin embargo estos modos se pueden agrupar en dos grupos: a) como amplificador y b) como interruptor.

El primer modo se describe en forma simplificada en la figura 4.5, en donde lo que se quiere de un dispositivo de amplificación es que sea capaz de recibir una señal variable con un voltaje o corriente característica de pequeña magnitud y que entregue una señal que varíe en forma similar con un voltaje o corriente mucho mayor. El transistor depende de la forma en que la corriente se distribuye entre sus capas para controlar la amplificación del voltaje, corriente o potencia a la salida de un circuito con respecto a su entrada. Para funcionar como amplificador el transistor opera en una región conocida como región lineal.



Figura 4.5 Acción amplificadora

En el modo de interruptor, el transistor opera en dos regiones extremas llamadas corte y saturación, de este modo, por un lado, aplicando un exceso de corriente en la compuerta, se puede hacer que el transistor conduzca su máxima corriente. Por el otro lado, al retirar la corriente de la compuerta, el flujo de corriente entre el colector emisor, se reduce a un valor muy pequeño que se puede considerar como apagado. La figura 4.6 bosqueja el modo de operación como interruptor.

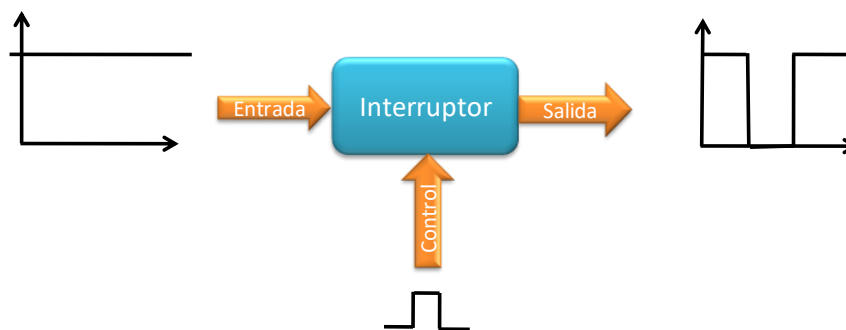


Figura 4.6 Acción interruptora.

A continuación se presentarán las tres configuraciones principales en que el transistor se conecta para operar como amplificador, de una manera simplificada. Posteriormente se profundizará en el estudio del transistor como interruptor, ya que este modo de operación es ampliamente usado en la electrónica de potencia.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

4.5 Amplificadores

Normalmente los circuitos amplificadores de señal de ca tienen dos terminales a la entrada y dos a la salida. Debido a que el transistor es un dispositivo con tres terminales, uno de estas terminales es común a la etapa de entrada y a la de salida. Cualquiera de las tres terminales puede seleccionarse como terminal común. Por lo tanto, existen tres circuitos básicos amplificadores con transistores:

- a) Circuito amplificador de base común
- b) Circuito amplificador de emisor común
- c) Circuito amplificador de colector común

A continuación se describen cada uno de estos.

4.5.1 Circuito amplificador de base común

La figura 4.7 muestra el circuito base común con un transistor del tipo NPN. Como se mencionó anteriormente la corriente del emisor y la corriente del colector son casi iguales. Cuando el transistor se usa en esta circuito, la razón de la corriente de salida a la de entrada, llamada ganancia de corriente, α , es aproximadamente 0.95 a 0.99. En este caso la corriente del colector se considera como la corriente de salida y la corriente del emisor como la corriente de entrada.

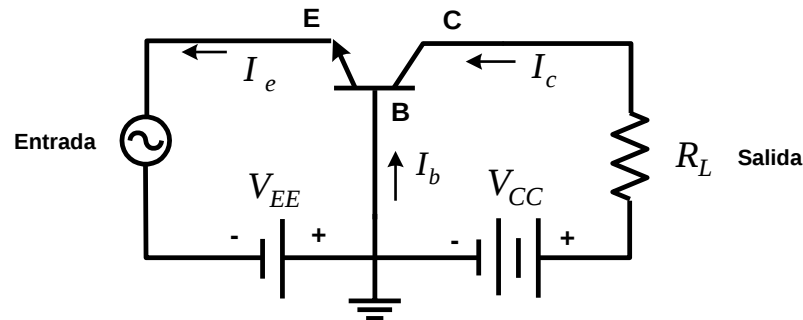


Figura 4.7 Circuito amplificador de base común, con transistor NPN

En general, el voltaje en la región con polarización directa (unión base-emisor) es bajo. Esta región presenta poca resistencia y se requiere poco voltaje para enviar una corriente relativamente alta a través de ella. La segunda región (base-colector) dado a que tiene polarización inversa presenta una resistencia mucho mayor al paso de la corriente. Puesto que el voltaje es el producto de la corriente por la resistencia, el voltaje resultante debe ser alto. La razón de la resistencia de salida a la resistencia de entrada en un transistor típico suele ser muy alta. Una resistencia de entrada típica puede ser 500Ω , y una de salida puede ser tan grande como $500 \text{ k}\Omega$. Esto da como resultado una razón, $R_{sal}/R_{ent} = 1000$

La figura 4.8, muestra el circuito base común usando el transistor PNP.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

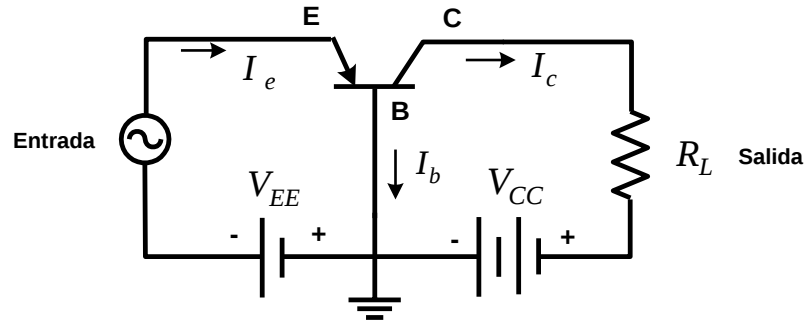


Figura 4.8 Circuito amplificador de base común, con transistor PNP

El factor de amplificación de voltaje A_v para un transistor se define como la razón del voltaje de salida al voltaje de entrada.

$$A_v = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} \quad \text{Factor de amplificación de voltaje.} \quad (4.6)$$

Esta razón es conocida como ganancia de voltaje.

Asociado a un incremento en voltaje hay un incremento de potencia. Recuérdese que la potencia disipada por un componente del circuito es igual al voltaje a través de dicho componente multiplicado por la corriente que pasa a través de ella. En cualquier caso, la ganancia de potencia G está dada por:

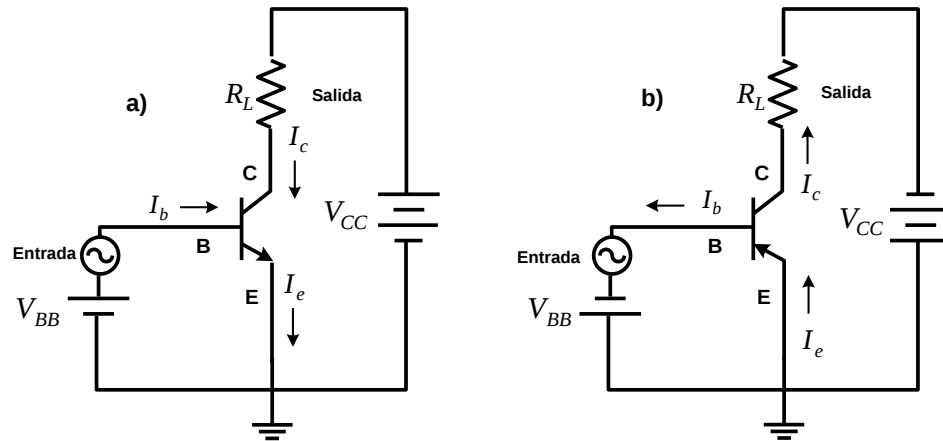
$$G = \frac{\text{potencia de sal}}{\text{potencia de ent}} = \frac{V_{sal}I_c}{V_{ent}I_e} \quad (4.7)$$

Pero ya que $\alpha = I_c/I_e$, puede escribirse

$$G = \alpha \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \alpha A_v \quad \text{Ganancia de potencia.} \quad (4.8)$$

4.5.2 Circuito amplificador de emisor común

La figura 4.9-a muestra el circuito emisor común con un transistor del tipo NPN, y la figura 4.9-b muestra el mismo circuito usando el transistor PNP.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA**Carrera:** Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.**Autor:** Dr. David Lara Alabazares**Figura 4.9 Circuito amplificador de emisor común con transistor: a) NPN y b) PNP**

En este circuito la entrada es a través del emisor de la base y la salida está en los terminales del emisor y el colector, a través de la resistencia de carga R_L . La unión del emisor-base presenta una polarización directa y la unión del colector-emisor tiene polarización inversa. Si la polarización de la unión del emisor-base se incrementa, la corriente que fluye a través de la unión de colector también lo hará como resultado del aumento de la corriente a través de la unión del emisor. Sin embargo, la corriente de la base retendrá su valor usual bajo. Esta corriente baja de la base es también la corriente que fluye en el circuito de entrada, por lo que en esta configuración se consigue una ganancia de corriente considerable en el circuito de salida (circuito colector) sobre la corriente en el circuito de entrada (base). La corriente de la base está dada por $I_b = I_e(1 - \alpha)$ y la corriente del colector es $I_c = \alpha I_e$. A partir de estas relaciones se puede obtener una expresión para la ganancia de corriente o factor de amplificación de corriente, A_i

$$A_i = \frac{I_{sal}}{I_{ent}} = \frac{\alpha I_e}{(1-\alpha)I_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (4.9)$$

Se usa un símbolo especial para denotar la ganancia de corriente de la expresión anterior. En consecuencia, para un transistor del que se conoce “a” la ganancia de corriente puede encontrarse de

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (4.10)$$

Esta también se conoce como la ganancia de corriente base-colector.

Para determinar la ganancia de voltaje deben considerarse las resistencias reales de entrada y salida. Como en el caso del circuito de base común, la resistencia de entrada se da a través de la unión del emisor polarizado en la dirección de conducción o directa y es muy baja. La resistencia de salida es alta pero no tanto como en el circuito de base común. El resultado es una ganancia de voltaje casi tan grande como en el circuito de base común. La ganancia de potencia depende de los productos de la ganancia de corriente y la ganancia de voltaje, mientras la ganancia de voltaje es ligeramente menor, la ganancia de corriente β es muchísimo mayor y la ganancia de potencia también lo es.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

El circuito de emisor común presenta otra característica muy importante. Cuando la señal de entrada hace que el potencial de base sea más negativo, incrementando la polarización directa de la unión de emisor, el potencial del colector varía en dirección opuesta y se hace más positivo. Como resultado, el circuito de emisor común tiene la propiedad de cambiar en ángulo de fase de la señal por 180° y actúa como inversor de señal.

4.5.3 Circuito amplificador de colector común

La figura 4.10-a muestra el circuito amplificador colector común con un transistor del tipo NPN, y la figura 4.10-b muestra el mismo circuito usando el transistor PNP.

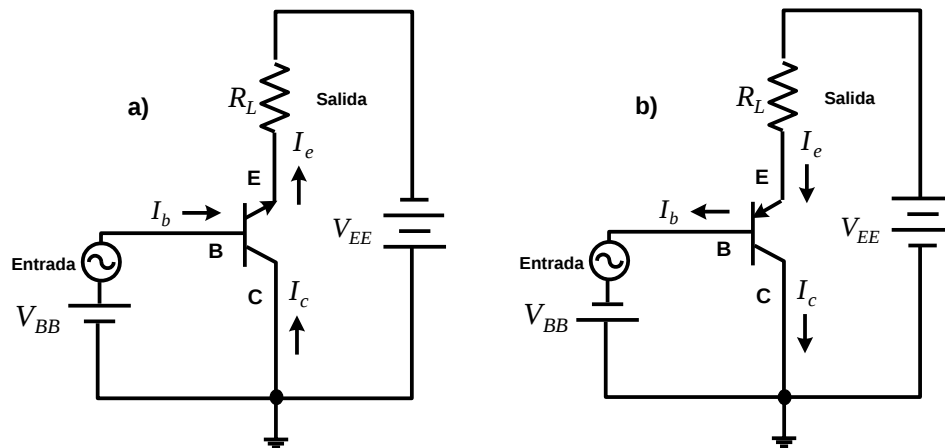


Figura 4.10 Circuito amplificador de colector común con transistor: a) NPN y b) PNP

Al considerar los mismos parámetros que para los otros dos circuitos, se tiene que la corriente de entrada, es la corriente de base y la corriente de salida es la corriente del emisor. En consecuencia, la ganancia de corriente es

$$A_i = \frac{I_{sal}}{I_{ent}} = \frac{I_e}{I_e(1-\alpha)} \quad (4.11)$$

Por lo tanto la ganancia de corriente en el circuito amplificador de colector común es:

$$A_i = \frac{1}{1-\alpha} \quad (4.12)$$

En este caso el voltaje de base es mayor que el voltaje de salida y la ganancia neta es menor que 1, la menor para los 3 arreglos. En relación con esto la resistencia de entrada es alta y la salida es baja. Finalmente, debido a la muy baja ganancia de voltaje, la ganancia de potencia también resulta ser la más baja de las 3 configuraciones. En la tabla 4-1 se compara las diferentes ganancias características de los 3 circuitos.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA
Carrera: Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

Tabla 4.1. Comparación de los tres circuitos amplificadores

	Base Común	Emisor Común	Colector Común
Ganancia de corriente.	α (baja)	β (alta)	$\frac{1}{1-\alpha}$ (máxima)
Ganancia de voltaje.	Máxima	Alta	Baja
Ganancia de potencia.	Moderada	Máxima	Mínima

Nota 1: El transistor requiere de una fuente de voltaje para su polarización antes que una señal pueda aplicarse para su amplificación u otro tipo de operación.

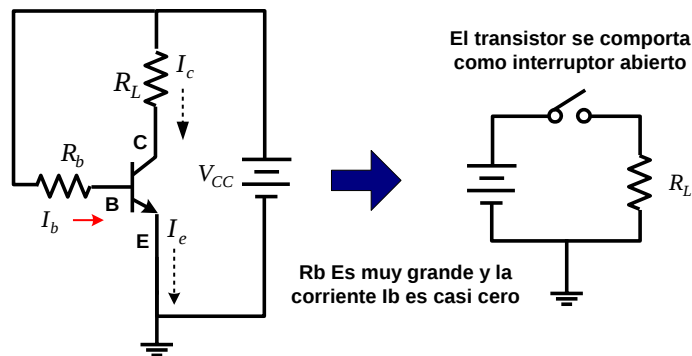
Nota 2: La corriente debe ser baja ya que los transistores pueden dañarse fácilmente a altas temperaturas.

Los fabricantes de transistores publican las hojas de datos y las gráficas de las características de los transistores. Estos documentos son útiles en el diseño de circuitos y para verificar que ninguno de los parámetros importantes vaya a excederse y destruir el transistor u otros elementos sensibles del circuito.

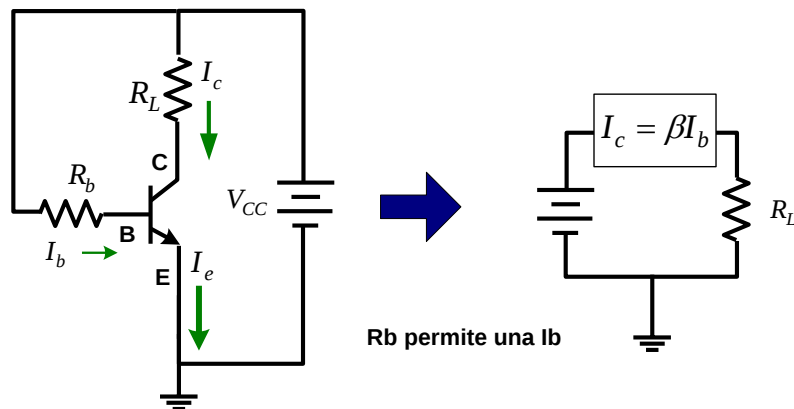
4.6. El transistor como interruptor

Cuando el transistor sale de la región activa, en un extremo entra en la región de corte, mientras que en otro extremo entra en la región de saturación. Estos dos modos extremos de operación son muy útiles si el transistor ha de usarse como interruptor, tal como en circuitos lógicos digitales. Para que un transistor funcione como un interruptor abierto o cerrado es necesario que circule o no circule corriente entre el colector y el emisor. En ambos casos se intercalan dos resistencias que tienen como misión limitar la cantidad de corriente que circula por la base y el colector, y que se llaman **R_b**, resistencia de base y **R_c**, resistencia de carga.

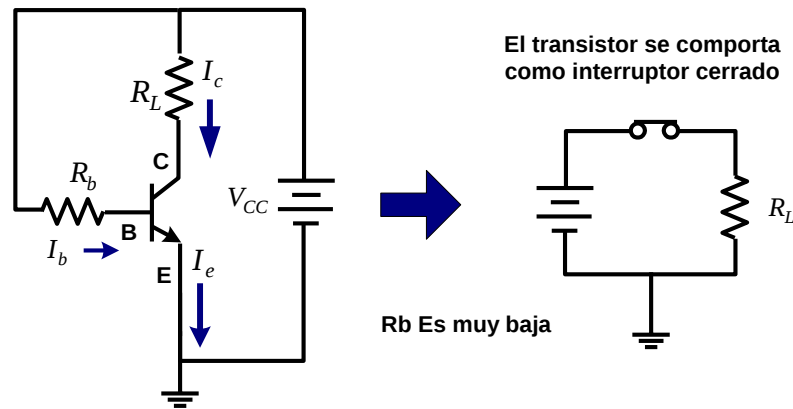
Zona de corte: Si **R_b** es muy grande, **I_b** = 0, es decir no circula corriente por la base, entonces no hay corriente entre colector y emisor. Por lo tanto el transistor se comporta como un circuito abierto.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA**Carrera:** Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.**Autor:** Dr. David Lara Alabazares**Figura 4.11 Transistor en zona de corte.**

Zona activa: Si R_b disminuye, I_b aumenta y permite pasar corriente entre colector y emisor. La relación que existe entre la intensidad del colector y la intensidad de la base es $I_c = \beta I_b$, donde β es la ganancia de corriente, donde un valor típico es aproximadamente 100.

**Figura 4.12 Transistor en zona activa**

Zona de saturación: Si aumentamos progresivamente el valor de intensidad en la base, llega un momento en el que la intensidad del colector no sigue aumentando. El transistor se comporta entonces como un interruptor cerrado.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA**Carrera:** Ingeniería Electromecánica, **Curso:** Electrónica Analógica, **Unidad 1:** El diodo semiconductor.**Autor:** Dr. David Lara Alabazares**Figura 4.13 Transistor en zona activa.**

En la práctica, se selecciona **Rb** lo suficientemente grande para permitir la corriente de base mínima necesaria para que el transistor entre en saturación. Para que el transistor entre en corte, el voltaje aplicado a la **Rb** se hace cero o se deja de aplicar.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Carrera: Ingeniería Electromecánica, Curso: Electrónica Analógica, Unidad 1: El diodo semiconductor.

Autor: Dr. David Lara Alabazares

4.8 Mapa de aprendizaje de la unidad

