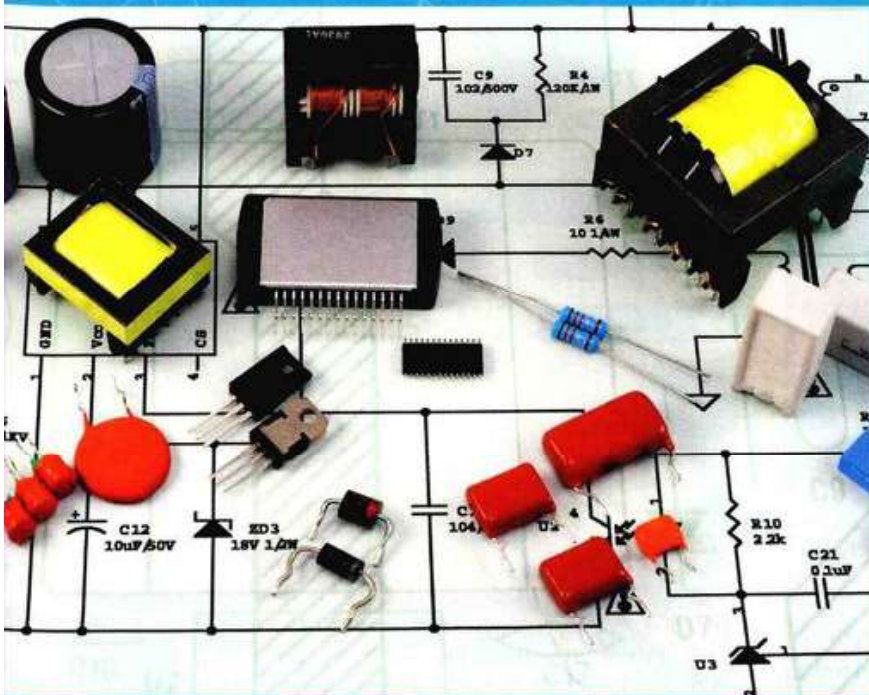


Transistores



Los transistores son fundamentales en la mayoría de los circuitos electrónicos que realizan la función de amplificación, control, estabilización de la tensión, etc. Hay que pensar que los dispositivos electrónicos que generan las señales de control, como una resistencia NTC en un termostato, una LDR en una barrera fotoeléctrica, un micrófono de audio, etc., producen señales eléctricas muy débiles que, en la mayor parte de las aplicaciones, hay que aumentar (proceso de amplificación) para poder conseguir alimentar a dispositivos o receptores, que necesitan de un aporte mayor de energía para su funcionamiento (altavoces, tubos de rayos catódicos, relés que ponen en marcha una lámpara o motor, etc.).

El invento del primer transistor por Shockley dio paso a una nueva era. A partir del transistor bipolar, se han ido desarrollando otro tipo de transistores, como el transistor de efecto de campo «FET» y el transistor de campo de óxido metálico «MOSFET» que por sus especiales características les hace ideales para el tratamiento de señales de radio frecuencia y en el diseño de circuitos digitales. Con ellos también se han desarrollado los circuitos integrados «chips», que reúnen en un solo componente multitud de transistores de todo tipo, diodos, resistencias, etc., consiguiendo miniaturizar y simplificar enormemente los circuitos. Los circuitos integrados consiguen realizar múltiples funciones con un solo componente, como las que realiza el microprocesador de un ordenador.

9

Contenidos

- 9.1. Transistores bipolares
- 9.2. Funcionamiento del transistor
- 9.3. Identificación de transistores
- 9.4. Intensidades de corriente en el transistor
- 9.5. Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor
- 9.6. Tensiones de ruptura
- 9.7. Características de los transistores bipolares
- 9.8. Polarización del transistor
- 9.9. Fototransistores

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los transistores.
- Describir las curvas características más representativas de los transistores, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- Interpretar los parámetros fundamentales que aparecen en las hojas técnicas de los fabricantes de transistores.
- Describir los circuitos de polarización del transistor.

9.1. Transistores bipolares

Al igual que los diodos de unión, los transistores bipolares se construyen gracias a la unión de los cristales semiconductores de tipo *P* y de tipo *N*.

El transistor es un componente fácilmente identificable por sus tres terminales de conexión que asoman al exterior a través de una de las bases de su cápsula (Figura 9.1). Estos suelen estar dispuestos en línea o según los vértices de un triángulo imaginario.

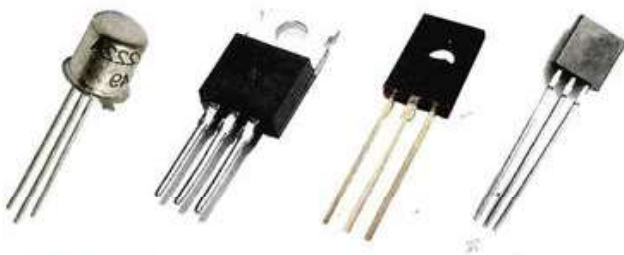


Figura 9.1. Aspectos de transistores con diferentes encapsulados.

Cada uno de estos terminales está unido a un cristal semiconductor de tipo *P* o tipo *N*. De esta forma, nos encontramos con un terminal de emisor, un terminal de base y otro de colector.

Existen dos tipos de transistores, los PNP y los NPN. En la Figura 9.2 se muestra la disposición de los cristales en cada uno de los tipos, así como su símbolo correspondiente. Obsérvese que si el transistor es PNP (PeNetra) la flecha correspondiente al emisor se dibuja hacia dentro y si es NPN (No PeNetra) dicha flecha se dibuja hacia fuera.

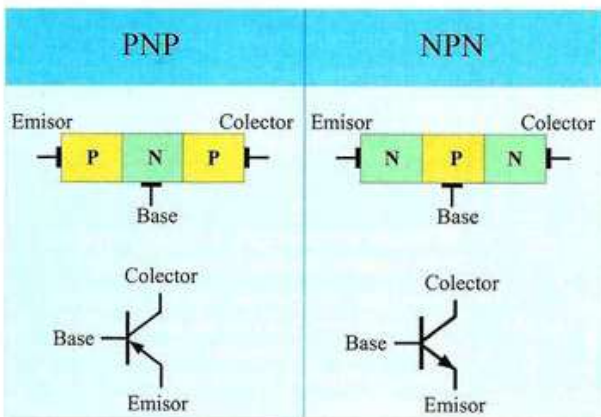


Figura 9.2. Transistores NPN y PNP.

La disposición de los terminales de un transistor depende del tipo de encapsulado con el que se haya construido. Esta información siempre se puede obtener consultado las hojas

de características que facilitan los fabricantes. En la Figura 9.3 se muestran algunos ejemplos de dónde se encuentra el emisor, la base y el colector de algunos encapsulados de transistores.

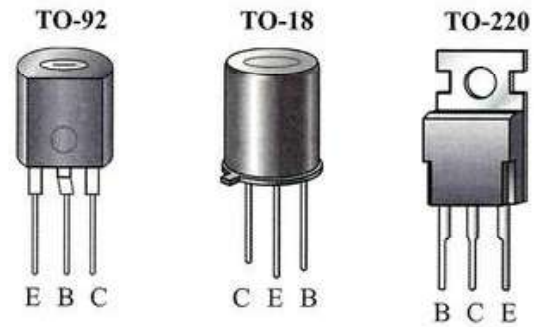


Figura 9.3. Ejemplos de disposición de terminales de un transistor.

En el proceso de fabricación de un transistor NPN, se hace que el cristal semiconductor correspondiente al emisor esté muy contaminado, por lo que contendrá un exceso de portadores de carga; su tarea consistirá en enviar o emitir estos portadores de carga (electrones) a la base. El cristal semiconductor de la base se fabrica extremadamente delgado y con un grado tenue de contaminación; los electrones emitidos por el emisor atraviesan, prácticamente en su totalidad, a este cristal, para acabar dirigiéndose al colector. La misión de la base consistirá en controlar dicho flujo de electrones. El cristal semiconductor del colector se fabrica con un grado de contaminación intermedio y recibe este nombre por recoger los electrones enviados por el emisor.

9.2. Funcionamiento del transistor

Para estudiar el funcionamiento del transistor, nos vamos a referir exclusivamente al tipo NPN.

Actividad experimental 9.1

- Localiza un transistor NPN en el compartimento de componentes del entrenador didáctico, por ejemplo el SC 107 y monta el circuito de la Figura 9.4 mediante un diodo LED conectado en serie con una resistencia de 470Ω y alimenta el conjunto por una pila o fuente de alimentación de 9 V.

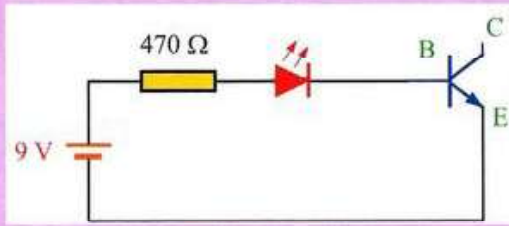


Figura 9.4.

Al probar el circuito, el diodo LED se tendrá que encender. Veamos cuál es la explicación de este fenómeno: al conectar el polo positivo de la pila a la base (cristal tipo P) y el negativo al emisor (cristal tipo N) la unión queda polarizada directamente y, por tanto, circulará una corriente elevada a través del cristal (como si se tratase de un diodo), que hace que el LED se encienda.

b) A continuación permuta los conductores en los terminales del transistor según se indica en el esquema de la Figura 9.5. Al probar el circuito, el diodo LED no se tiene que encender.

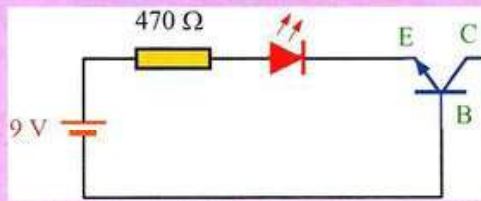


Figura 9.5.

¿Cuál es la explicación? Si se polariza la unión emisor-base PN en sentido inverso, la corriente a través del cristal será prácticamente nula y, por tanto, el diodo LED permanecerá apagado (Figura 9.6).

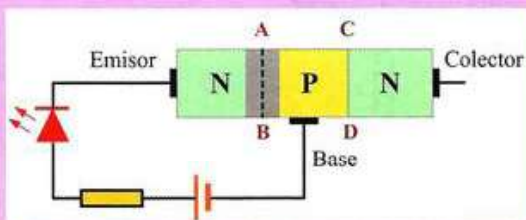


Figura 9.6.

c) Realiza a continuación las conexiones con los terminales de base y colector, tal como se indica en el esquema de la Figura 9.7 y explica por qué se enciende el diodo en este caso.

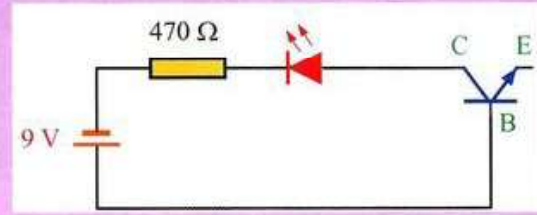


Figura 9.7.

d) Ahora permuta los conductores de la pila, de tal forma que la base quede conectada al terminal negativo y el colector al diodo LED. Dibuja el esquema de conexiones y explica por qué no se enciende el diodo LED en este caso.

e) Seguidamente, conecta los terminales del colector y emisor, tal como se muestra en la Figura 9.8. Podrás comprobar cómo en este caso el diodo LED no se enciende.

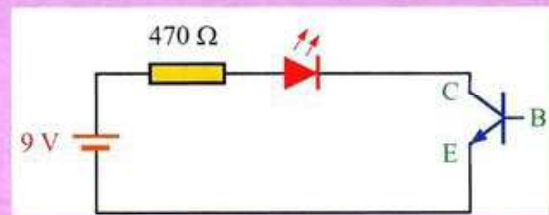


Figura 9.8.

¿Cuál es la explicación? Los electrones libres del cristal N del emisor son repelidos por el polo negativo de la pila (Figura 9.9), mientras que los electrones libres del cristal N del colector son atraídos por el polo positivo. De todo esto se deduce que se produce un desplazamiento de electrones en el sentido del emisor al colector. A pesar de ello, los electrones del emisor no poseen la suficiente energía para atravesar las barreras AB y CD de las uniones, las cuales los repelen.

La corriente emisor-colector es, por tanto, muy pequeña y por eso el diodo LED no se enciende, por lo que se considera a efectos prácticos como una corriente de fuga.

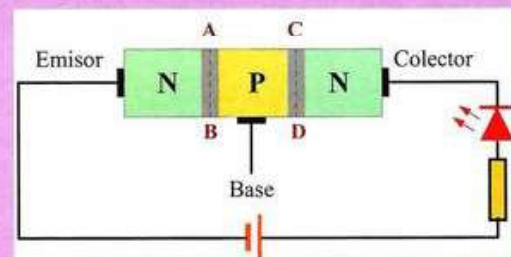


Figura 9.9.

f) Consigue una resistencia de 1.000Ω y una pila de $1,5 \text{ V}$ y realiza el montaje que se propone en la Figura 9.10. Podrás comprobar cómo en este caso sí que se enciende el diodo LED.

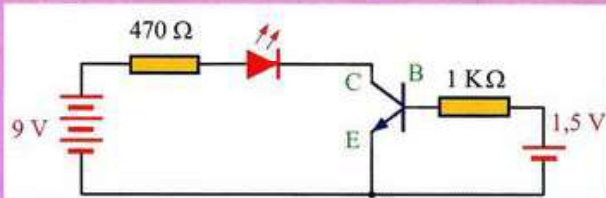


Figura 9.10.

¿Cuál es la explicación? La principal barrera que se oponía al paso de los electrones desde el emisor al colector la constituía la barrera AB (Figura 9.11), ya que una vez atravesada esta los electrones se encuentran bajo la influencia del campo eléctrico del polo positivo.

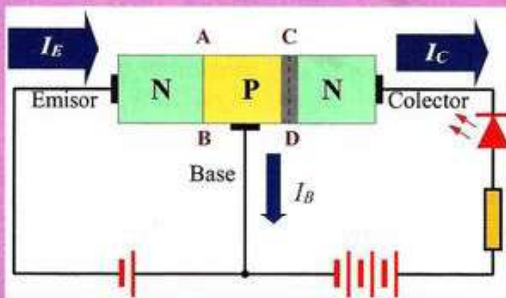


Figura 9.11.

Al aplicar una pequeña tensión positiva a la base (cristal P), con respecto al emisor (cristal N), dicha barrera desaparecerá, por quedar polarizada directamente la unión de los cristales PN que la componen, sintiéndose atraídos los electrones por los potenciales positivos de la base y del colector. Dado que el potencial positivo del colector es mucho más elevado que el de la base, los electrones se sentirán más atraídos por el primero, por lo que se obtiene una elevada corriente de colector I_C (que hace que el diodo LED se encienda) y una pequeña corriente de base I_B .

A esta explicación hay que añadir que, al ser el cristal de la base extremadamente delgado y estar débilmente contaminado con unos pocos huecos, la base se satura rápidamente al ser invadida por la gran cantidad de electrones provenientes del emisor, lo que causa una difusión de estos hacia la zona de empobrecimiento de la unión con el colector. Una vez que los electrones

han superado la unión, son atraídos con fuerza por el fuerte campo eléctrico positivo a que está sometido el colector.

El número de electrones que fluyen hacia el colector será más elevado cuanto mayor sea la tensión de polarización directa del diodo base-emisor. Por lo que se puede decir que esta tensión junto con la corriente de base, controlan la corriente de colector. Haciendo un símil, podríamos decir que la tensión de polarización del diodo base-emisor abre más o menos una compuerta por donde pasan los electrones; esta compuerta se consigue abrir con un pequeño esfuerzo (débil corriente de base); sin embargo, por ella pasan una gran cantidad de electrones, que se dirigen hacia el colector, debido al fuerte potencial eléctrico que este posee.

Si tenemos en cuenta que la corriente de base es muy pequeña con respecto a la del colector y que esta última varía en consonancia con la primera, habremos comprendido la más importante propiedad del transistor, consistente en su capacidad de amplificación de corriente.

Este fenómeno nos permitirá que, con la débil corriente que puede tener cualquier forma de variación en el tiempo, como pueden ser señales de radio, TV, sonido, etc., podamos obtener la misma forma de variación en el tiempo sobre una corriente mayor, procedente de una fuente de alimentación, lo que da lugar a poder transformar señales débiles en otras suficientemente fuertes para producir, por ejemplo, sonido en un altavoz, imagen en un televisor, etc. (Figura 9.12).

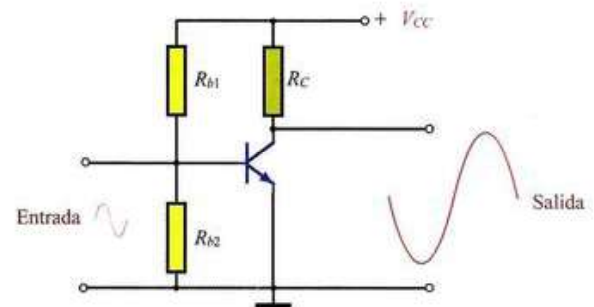


Figura 9.12. El transistor como amplificador.

El estudio que se ha hecho para el transistor NPN es igualmente válido para el PNP, con la única diferencia de que en el caso del transistor PNP la conducción se produce cuando se aplica una tensión negativa en el colector con respecto al emisor y una tensión igualmente negativa, aunque de inferior valor a la base, con respecto al emisor (Figura 9.13).

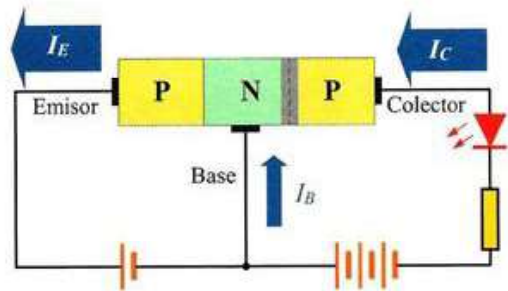


Figura 9.13. Polarizaciones en un transistor PNP.

El transistor es capaz de controlar la corriente principal que fluye entre el colector y el emisor gracias a la pequeña corriente aplicada a la base.

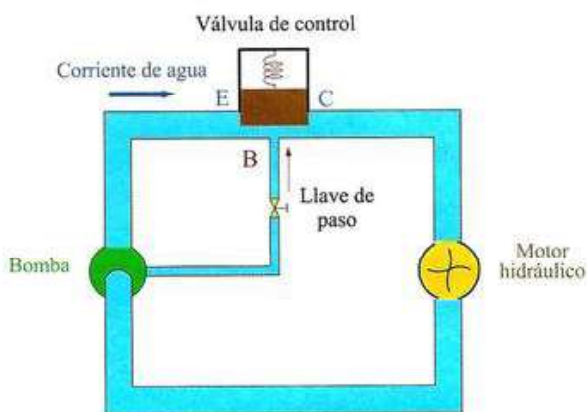
Si la corriente por la base es nula, también lo será la corriente entre el emisor y el colector, quedando el transistor en corte.

Si la corriente por la base es grande, la corriente entre el emisor y el colector se hace máxima, entrando el transistor en saturación.

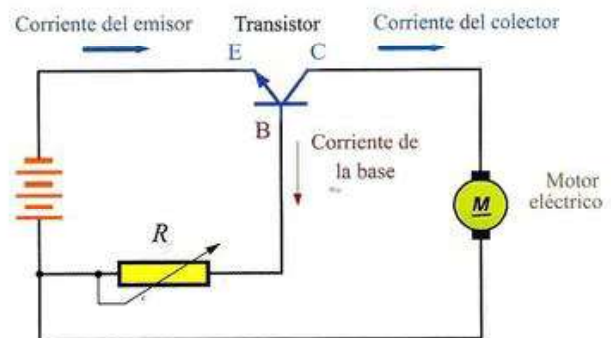
Si hacemos variar la pequeña corriente aplicada a la base entre los valores que producen el corte y la saturación, la corriente principal entre el emisor y el colector seguirá estas variaciones pero con corrientes más fuertes (efecto de amplificación).

9.2.1. Símil hidráulico del funcionamiento del transistor

Para ayudarnos a entender mejor el funcionamiento de un transistor, vamos a hacer una comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico (Figura 9.14 y Tabla 9.1).



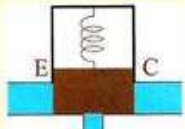
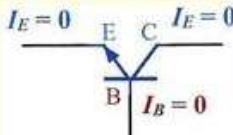
Circuito hidráulico



Circuito eléctrico

Figura 9.14. Comparación entre un circuito hidráulico y un circuito con transistor.

Tabla 9.1. Símil hidráulico del funcionamiento del transistor.

Circuito hidráulico	Circuito eléctrico
La bomba impulsa el agua a través de la válvula de control hacia el motor hidráulico	La fuente de alimentación impulsa a la corriente eléctrica a través del transistor hacia el motor eléctrico
 <p>Válvula cerrada</p> <p>Si la llave de paso está cerrada, la válvula de control también está cerrada gracias al muelle de cierre de la misma, por lo que el motor hidráulico no se mueve.</p>	 <p>Transistor en corte</p> <p>Si variamos la resistencia del potenciómetro R, hasta conseguir que la intensidad por la base (I_B) sea nula, la unión base emisor no está polarizada, por lo que, tanto la corriente de emisor (I_E) como la de colector se anulan (I_C) (<i>funcionamiento del transistor en corte</i>) y el motor no se mueve.</p>

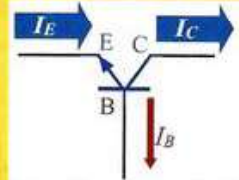
(continúa)

(Continuación)



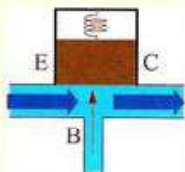
Válvula entreabierta

Si abrimos más o menos la llave de paso, la presión que llega a la válvula de control empuja el muelle y hace que esta se habrá también más o menos. El caudal por la tubería principal se hará más o menos grande y el motor hidráulico se moverá con más o menos velocidad. Con un pequeño aumento del caudal en la tubería de la llave de paso se consigue un aumento más grande en la tubería principal. De esta forma, conseguimos regular la velocidad del motor hidráulico con un pequeño esfuerzo en la llave de paso (amplificación).



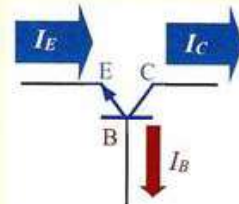
Transistor en regulación

Si variamos más o menos la resistencia del potenciómetro hasta conseguir que la pequeña intensidad por la base sea suficiente para polarizar la unión base emisor, se conseguirá que aparezca un valor de intensidad de corriente en el emisor y colector lo suficiente grande para mover el motor eléctrico (*funcionamiento del transistor en regulación*). Con un pequeño aumento en la corriente de base se consiguen aumentos más grandes en las corrientes de emisor y colector (amplificación).



Válvula abierta

Si abrimos la llave de paso los suficiente para conseguir que la presión sobre el muelle se desplace hasta su posición máxima, la válvula principal se abrirá totalmente. El caudal por la tubería principal se hará ahora máximo y el motor hidráulico se moverá a la máxima velocidad.



Transistor en saturación

Si variamos la resistencia del potenciómetro hasta conseguir que la corriente de base polarice el transistor hasta el máximo, la intensidad del colector se hará máxima (*funcionamiento del transistor en saturación*) y el motor eléctrico se moverá a la máxima velocidad.

9.3. Identificación de transistores

La mejor forma de identificar un transistor es anotar su referencia y, posteriormente, consultar sus características en las hojas de especificaciones técnicas del fabricante, o en un libro de características de transistores.

Mediante un método muy sencillo se puede determinar si un transistor desconocido es del tipo PNP o NPN. Este método consiste en tomar varias medidas, con el polímetro utilizado como óhmetro en el rango de x100, de las resistencias que aparecen entre los diferentes terminales del transistor (Figura 9.15).



Figura 9.15. Identificación del tipo de transistor mediante un polímetro.

Actividad experimental 9.2

Toma un transistor desconocido y averigua de qué tipo es, así como la disposición de sus terminales. Seguidamente, se exponen algunas ideas para conseguirlo.

Primero determinamos cuál de los terminales del transistor corresponde a la base. Esto se consigue midiendo la resistencia con el óhmetro entre los diferentes terminales. En un transistor en buen estado, la resistencia entre el colector y el emisor es siempre muy alta, cualquiera que sea la polaridad aplicada por el óhmetro; cuando se haga esta verificación, el otro terminal corresponderá a la base.

Una vez localizada la base, conectamos la punta de prueba positiva en ella y la negativa en cualquiera de los otros dos terminales del transistor: si la resistencia obtenida es muy baja (se ha polarizado la unión de uno de los dos diodos por efecto de la tensión positiva aplicada con el óhmetro a la base P) se trata de un transistor tipo NPN; si obtenemos una resistencia muy alta (no se ha polarizado la unión) se trata de un transistor PNP.

Por si te sirve de ayuda, en la Tabla 9.2 se indican las medidas de resistencia que se dan en cada caso para los dos tipos de transistores.

Con este sencillo procedimiento también se puede llegar a averiguar cuál de los terminales corresponde al emisor y cuál al colector. Para ello, hay que tener en cuenta que:

La resistencia y tensión de barrera de la unión base-colector es algo menor que la correspondiente a la unión base-emisor.

Tabla 9.2.

Punta roja (+)	Punta negra (-)	PNP	NPN
		Medida óhmetro	Medida óhmetro
colector	emisor	R_{alta}	R_{alta}
emisor	colector	R_{alta}	R_{alta}
emisor	base	R_{baja}	R_{alta}
base	emisor	R_{alta}	R_{baja}
base	colector	R_{alta}	R_{baja}
colector	base	R_{baja}	R_{alta}

Esta diferencia es más apreciable si medimos la tensión de barrera con un polímetro digital.

9.3.1. Comprobación del estado de un transistor

Para comprobar si un transistor está en buen estado utilizaremos el óhmetro. Con él verificaremos la resistencia entre los terminales del transistor con las diferentes posibilidades de polarización, teniendo en cuenta que: a) con cualquier polaridad, la resistencia obtenida, al aplicar el óhmetro entre el colector y el emisor, es siempre muy alta para un transistor en buen estado; b) al polarizar directamente cualquiera de las uniones entre base-colector y base-emisor, la resistencia obtenida para un transistor en buen estado debe ser baja.

Por otro lado, los polímetros digitales suelen ir equipados con un dispositivo, llamado transistómetro, para poder conectar el transistor y así poder determinar su ganancia. Para ello dispone de dos filas de tres conexiones, una para transistores PNP y otra para NPN, tal como se muestra en la Figura 9.16.



Figura 9.16. Medida de la ganancia mediante polímetro digital.




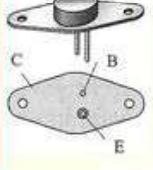
Con este dispositivo podemos medir la ganancia de un transistor una vez conectado en el apartado que le corresponde, según su tipo y en el orden de terminales correcto. Aprovechando el transistómetro, se puede verificar el estado de un transistor, ya que si este está en buen estado tendrá que medirse una ganancia aceptable. Con este sistema también es posible comprobar la disposición de los tres terminales del transistor, ya que hasta que este no se conecta adecuadamente al transistómetro no se mide ganancia alguna.

9.3.2. Encapsulado de transistores

El tamaño de la capsula de un transistor depende de la potencia que es capaz de disipar. Los transistores se fabrican en diferentes tipos de encapsulados normalizados en fun-

ción de la aplicación. En la Tabla 9.3 se muestra un resumen de los encapsulados más utilizados y la disposición de sus terminales.

Tabla 9.3. Encapsulado de transistores.

TO-18		Se emplea para transistores de pequeña señal. El cuerpo está formado por una carcasa metálica.
TO-92		Muy utilizado en transistores de pequeña señal. El cuerpo es de plástico.
TO-126		Se emplean para transistores de pequeña potencia y existe la posibilidad de fijarlos a aletas de refrigeración mediante un tornillo, gracias al orificio central con el que viene dispuesto.
TO-220		Se utilizan para transistores de algo más de potencia que los anteriores. Aquí también es posible la fijación de una aleta de refrigeración.
TO-3		Se emplean en transistores de gran potencia. Su cuerpo es metálico y se suelen fijar a aletas de refrigeración a través de dos tornillos. Solo dispone de dos terminales, ya que el colector se conecta directamente al cuerpo metálico.

9.3.3. Identificación de componentes semiconductores

Para identificar a los semiconductores se inscribe en su encapsulado un código de designación normalizado, como por ejemplo el BC107. Este código nos proporciona información básica sobre el tipo de componente semiconductor.

En la actualidad existen tres tipos de códigos según el país de origen:

PROELECTRON	Europa
JEDEC	Estados Unidos
JIS	Japón

Actividad propuesta 9.1

Averigua el significado de los siguientes códigos de designación: BC107-BSX51-1N4001-2N1025-2SB984.



Para poder resolver esta actividad consulta en el MATERIAL WEB que se ha elaborado para este texto el documento: «Identificación de componentes semiconductores», donde podrás encontrar el significado de cada uno de los códigos según el país.

9.4. Intensidades de corriente en el transistor

En los apartados anteriores hemos estudiado, de una forma experimental, el funcionamiento del transistor. Completaremos a continuación algunos otros aspectos más particulares del mismo, como son la relación de intensidades de corriente que aparecen en cada uno de los terminales del transistor. Pero antes vamos a realizar un pequeño repaso de los conocimientos ya adquiridos, intentando, a su vez, dar una mayor profundidad a los mismos.

Este estudio lo realizaremos también sobre un transistor NPN. Este tipo es más utilizado que el PNP, ya que actúa algo más rápido y se adapta mejor a los sistemas donde se conecta el negativo a masa. No obstante, es fácil encontrar los dos tipos de transistores en un mismo circuito, ya que su combinación amplía las posibilidades del diseñador.

Tal como está polarizado el transistor NPN (Figura 9.17), el diodo formado por la unión del emisor y la base queda polarizado directamente con la tensión V_{BE} . Para que esto ocurra, será suficiente con una tensión mínima, superior a la umbral, que en el caso del silicio será de 0,6 V a 0,7 V. Este fenómeno de polarización directa hace que la resistencia base-emisor (R_{BE}) disminuya a un valor muy reducido (por debajo de los 100 Ω).

Por otro lado, el diodo formado por la unión de la base y el colector aparece polarizado inversamente por la tensión V_{CB} , que es de un valor mucho más alto que V_{BE} . De aquí, se deduce que la resistencia entre el colector y la base (R_{CB}) sea de un valor elevado (unos 10 k Ω).

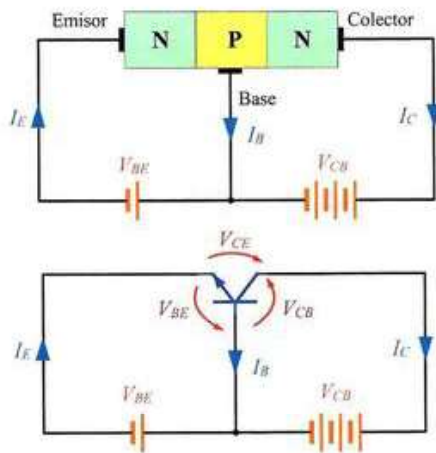


Figura 9.17.

Sin embargo, tal como se pudo apreciar en las experiencias llevadas a cabo, la corriente es capaz de atravesar tanto la unión polarizada directamente como la polarizada inversamente. De tal forma que el valor de la corriente que entra por el emisor I_E se acerca bastante a la del colector I_C , por tanto la corriente que sale de la base será muy pequeña.

Efectivamente, la región que ocupa la base del transistor es muy reducida y está mínimamente impurificada, por lo que posee muy pocos huecos. De esta forma, los electrones que emite el emisor superan sin dificultad la unión emisor-base, por estar polarizada directamente. Pero es probable que uno de estos electrones encuentre en la base un hueco libre con el que combinarse. Por ello, la corriente de base será muy débil. Sin embargo, estos electrones, una vez que superan la barrera de emisor-base, se sienten fuertemente atraídos por el potencial eléctrico positivo del colector, por lo que se establece un valor considerable de corriente de colector I_C .

Lo normal es que el 99 % de la corriente del emisor se dirija directamente al colector y que el 1 % restante lo haga a la base.

Se puede establecer una ecuación que relacione estas tres corrientes, de tal forma que:

$$I_E = I_C + I_B$$

A pesar de que la corriente de base es muy débil, esta es muy valiosa, ya que gracias a ella se puede gobernar la gran corriente que aparece en el colector. De tal forma que, si la corriente de base fuese nula, no habría corriente de colector. Téngase en cuenta que, al desaparecer la tensión de polarización de la unión emisor-base, los electrones del emisor no pueden superar esta barrera.

9.5. Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor

La circunstancia de que una pequeña corriente de base controle las corrientes de emisor y colector mucho más elevadas, indica la capacidad que posee un transistor para conseguir una gran ganancia de corriente. Así, la ganancia de corriente de un transistor es la relación que existe entre la variación o incremento de la corriente de colector y la variación de la corriente de base.

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Actividad resuelta 9.1

En el caso de que en un transistor se obtenga una variación de corriente de colector de 8 mA y de 0,08 mA en la corriente de base, la ganancia será:

$$\beta = \frac{8}{0,08} = 100$$

La ganancia de corriente de los transistores comerciales varía bastante de unos a otros. Así, nos podemos encontrar transistores de potencia que poseen una β de tan solo 20. Por otro lado, los transistores de pequeña señal pueden llegar a tener una β de 400. Por todo ello, se puede considerar que los valores normales de este parámetro se encuentran entre 50 y 300.

En las hojas de especificaciones técnicas, que facilitan los fabricantes de transistores, en vez de utilizarse β para identificar la ganancia de corriente, se suele utilizar h_{FE} . Así por ejemplo, para el transistor con referencia BC 108, se lee en sus hojas de características una h_{FE} entre 150 y 290; lo que nos indica que la ganancia de corriente de este transistor puede encontrarse entre estos valores.

La ganancia de corriente varía notablemente con la corriente de colector. Además, la temperatura ambiente influye positivamente en el aumento de dicha corriente. Hay que pensar que, al aumentar la temperatura de la unión del diodo colector, aumenta el número de portadores minoritarios y, por tanto, se produce un aumento de la corriente de colector.

9.6. Tensiones de ruptura

Al igual que ocurría con los diodos, cuando se polariza inversamente cualquiera de las uniones de un transistor, aparecen pequeñas corrientes inversas, que no provocarán la ruptura de dichas uniones, si la tensión que se aplica no supera los valores máximos fijados en las hojas de especificaciones técnicas. Se pueden dar dos casos diferentes a tener en cuenta:

a) **Tensión inversa colector-base (V_{CBO}) con el emisor abierto:** en la Figura 9.18 se ha abierto el circuito del emisor; observa cómo la unión formada por la base y el colector están polarizadas inversamente con la tensión V_{CB} . Como ocurría con los diodos, esto provoca la circulación de una pequeña corriente de fuga (I_{CBO}) que no será peligrosa hasta que no se alcance la tensión de ruptura de la unión. Normalmente esta tensión suele ser elevada (del orden de 20 a 300 V).

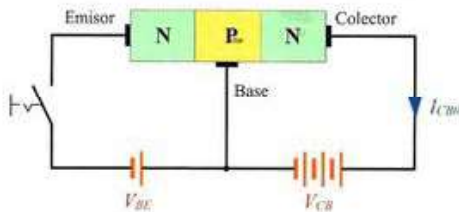


Figura 9.18. Transistor con el emisor abierto.

Nunca deberá trabajarse, por supuesto, con una tensión superior a la indicada por el fabricante en sus hojas técnicas.

Este dato suele aparecer indicado con las siglas V_{CBO} .

b) **Tensión inversa colector-emisor (V_{CEO}) con la base abierta:** en este otro caso, se ha abierto la base y, por tanto, se aplica una tensión entre el colector y el emisor que es igual a la suma de las tensiones de las dos fuentes (Figura 9.19). Esta fuerte diferencia de potencial provoca un pequeño flujo de electrones que emite el emisor y que se sienten fuertemente atraídos por el potencial positivo de la fuente. El resultado es una pequeña corriente de fuga de emisor a colector I_{CEO} . Al igual que ocurría anteriormente, el valor de esta corriente está determinado por la tensión colector-emisor (V_{CEO}) aplicada. En las hojas técnicas también aparece la tensión máxima de funcionamiento (V_{CEO}), que en ningún caso debe ser superada, para evitar el peligro de destrucción del semiconductor.

Así, por ejemplo, para el transistor BC 108, en las hojas de especificaciones técnicas aparecen los siguientes valores para las tensiones de ruptura: $V_{CBO} = 30$ V y $V_{CEO} = 20$ V, lo que significa que este transistor nunca deberá operar con tensiones superiores a estos valores especificados.

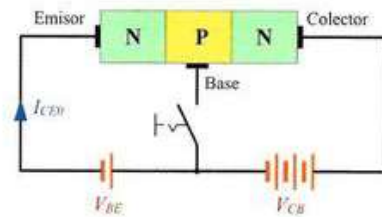


Figura 9.19. Transistor con la base abierta.

9.7. Características de los transistores bipolares

Las curvas características del transistor relacionan entre sí todas las magnitudes de tensión e intensidad de corriente que se dan en él, como son: la tensión colector-emisor (V_{CE}), la tensión base-emisor (V_{BE}), la tensión colector-base (V_{CB}), la corriente de base (I_B), la corriente de colector (I_C) y la corriente de emisor (I_E). De esta forma, conociendo las curvas características, se puede entender el funcionamiento del transistor, así como determinar la mayor parte de los aspectos que lo definen, como pueden ser: parámetro β , resistencia de entrada y resistencia de salida, ganancia de tensión, determinación del punto de funcionamiento de un transistor y otras más.

9.7.1. Curvas características con el emisor común (EC)

La mayoría de los circuitos con transistores utiliza el emisor como terminal común entre la entrada y la salida, en vez de la base. En la Figura 9.20 se muestra el circuito básico con la configuración en emisor común (EC).

Ahora la base hace de electrodo de entrada y el colector de electrodo de salida.

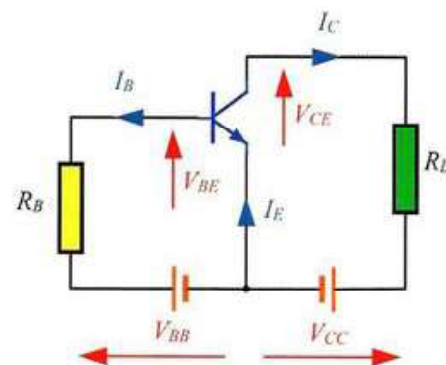


Figura 9.20. Transistor en emisor común.

El funcionamiento del transistor en este circuito es similar al de la configuración BC. Cuando la tensión de polarización directa V_{BE} del diodo emisor-base supera los 0,7 V (para transistores de silicio), los electrones libres, que provienen del emisor, traspasan la delgada capa de la base, en dirección al colector, empujados por el fuerte potencial eléctrico causado por la polarización inversa V_{CE} . Como podremos comprobar en las curvas características, el valor de la corriente de colector dependerá casi exclusivamente de la corriente de base.

Características $I_C = f(V_{CE})$ para $I_B = cte$

Estas características también son conocidas como familia de colector, ya que son las correspondientes a la tensión e intensidad del colector. En la Figura 9.21 se muestra una familia de curvas de colector para diferentes valores constantes de la corriente de base.

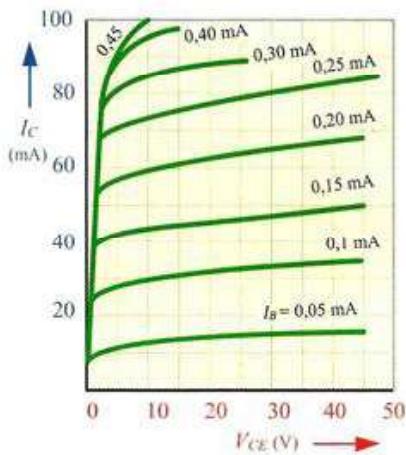


Figura 9.21. Curvas $I_C = f(V_{CE})$ para I_B constante.

Estas curvas representan, en cierto modo, la forma de funcionamiento del transistor. Se puede comprobar que, para una tensión constante de colector-emisor, si se producen pequeñas variaciones de la corriente de base (del orden de μA) se originan unas variaciones en la corriente del colector mucho más elevadas (del orden de mA). De lo cual se deduce la capacidad del transistor para amplificar corrientes.

Observa que, en la mayor parte de las curvas, la tensión V_{CE} afecta muy poco a la corriente de colector I_C . Si se aumenta V_{CE} demasiado (por encima de V_{CEO}), la unión del colector entra en la región de ruptura y este puede llegar a destruirse. Sin embargo, si la tensión V_{CE} es muy pequeña (por debajo de 0,7 V), la corriente de colector será muy

débil, por lo que se obtiene una ganancia de corriente muy baja. En conclusión, para conseguir que el transistor trabaje como amplificador de corriente, la tensión de polarización inversa V_{CE} debe mantenerse por encima de 0,7 V y por debajo de la tensión de ruptura.

Característica $I_B = f(V_{BE})$ para $V_{CE} = cte$

Mediante esta curva podemos determinar los efectos que producen las variaciones de la tensión de polarización V_{BE} sobre la corriente de base I_B . Estas gráficas reciben el nombre de curvas características de transferencia. Las curvas que se obtienen son muy similares a las de un diodo cuando se le polariza directamente. En la Figura 9.22 se muestra la diferencia existente entre la característica de un transistor de germanio y uno de silicio. El transistor de germanio comienza a conducir cerca de los 0,2 V y el de silicio a los 0,6 V, aproximadamente.

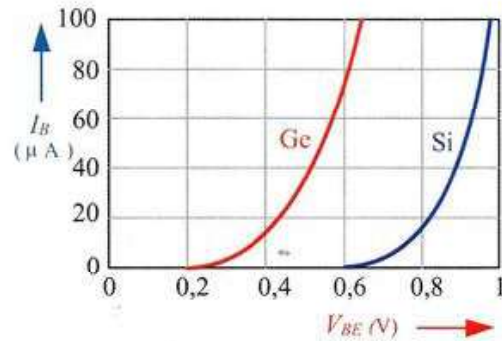


Figura 9.22. Curvas $I_B = f(V_{BE})$ para V_{CE} constante.

Estas tensiones permanecen prácticamente constantes, por lo que serán de gran ayuda para localizar averías en circuitos con transistores.

Los transistores de germanio se han ido dejando de utilizar paulatinamente, lo que ha dado paso a los de silicio, que son más baratos y responden mejor a las altas temperaturas. No obstante, el germanio ofrece algunas ventajas en determinadas aplicaciones.

9.7.2. Curva de potencia máxima de un transistor

Una de las aplicaciones de las curvas características de un transistor es que, a partir de estas, se pueden determinar sus límites de funcionamiento. Estos límites están determinados por la potencia máxima que puede desarrollar un transistor sin provocar su destrucción.

Veamos en qué consiste este fenómeno: el transistor posee una resistencia entre el colector y el emisor, que varía en función de la intensidad que se le aplique a su base I_B . Por esta resistencia variable circula una corriente I_C , relativamente grande, que provoca en ella una potencia calorífica, debido al efecto Joule. Esta potencia se calcula realizando el producto de la tensión V_{CE} , aplicada entre el colector y el emisor, por la intensidad de colector I_C .

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

Como esta potencia se transforma íntegramente en calor, provoca un aumento de la temperatura en el transistor que, en el caso de salirse de los límites admisibles, provocará la destrucción de este.

La potencia máxima de trabajo de un transistor es un dato que proporcionan los fabricantes en las hojas de especificaciones técnicas.

Actividad resuelta 9.2

Supongamos que poseemos un transistor con una potencia máxima de 600 mW.

Con este dato se puede trazar una curva de potencia máxima sobre la familia de curvas de colector, para así poder determinar para qué tensión de colector-emisor y corriente de colector es posible trabajar con el transistor sin que se deteriore.

De esta forma, para no superar los valores límite en nuestro ejemplo se deberá cumplir en todo momento la expresión:

$$P_{\text{máx}} = V_{CE} \cdot I_C = 600 \text{ mW} = 0,6 \text{ W}$$

Luego la curva de potencia máxima para este transistor será tal que el producto de V_{CE} por I_C sea igual a 0,6 W.

En la Figura 9.23 se muestran las curvas correspondientes a la familia de colector del transistor de nuestro ejemplo, y en las que se ha añadido la curva de potencia máxima. Para trazarla, se ha procedido de la siguiente forma:

Primero, se fijan una serie de tensiones de colector-emisor; por ejemplo: 0 V, 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 25 V, 30 V, 35 V, 40 V y 45 V. Seguidamente, se calculan las corrientes máximas que podrán circular por el colector para cada una de estas tensiones, sin que se

sobrepase la potencia máxima de 0,6 W. Los diferentes valores de I_C vendrán dados por la fórmula:

$$I_C = \frac{P_{\text{máx}}}{V_{CE}}$$

De esta forma tendremos que:

$$\text{Para } V_{CE} = 0 \text{ V, } I_C = \frac{0,6}{0} = \infty \text{ A}$$

$$\text{Para } V_{CE} = 5 \text{ V, } I_C = \frac{0,6}{5} = 0,120 \text{ A} = 120 \text{ mA}$$

Siguiendo este mismo proceso, podrás comprobar que aparecen las siguientes parejas de valores:

V_{CE} (V)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
I_C (mA)	∞	120	60	40	30	24	20	17	15	13

Una vez hecho esto, se llevan los valores obtenidos a la familia de curvas de colector, formando el resultado de la unión de los puntos una hipérbola como la que se muestra en la Figura 9.23.

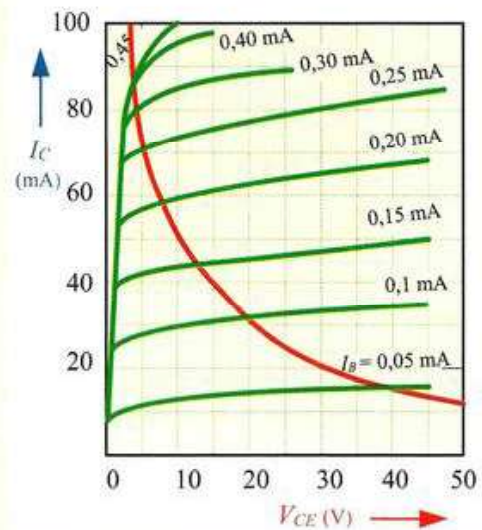


Figura 9.23. Curva de potencia máxima de un transistor.

Esta hipérbola divide la característica en dos zonas claramente diferenciadas: la zona prohibida de funcionamiento, que queda por encima de ella y en la cual la potencia es superior a 600 mW y, por tanto, es ahí donde el transistor corre peligro de destrucción por la acción del calor; y la zona de trabajo, que queda por debajo de la hipérbola y en la cual la potencia es inferior a 600 mW.

Influencia de la temperatura ambiente en la potencia máxima de un transistor

La potencia máxima que un transistor puede disipar en forma de calor depende de la temperatura máxima permitida en la unión del colector T_j (máx). Esta temperatura nunca debe ser superada, ya que a partir de ella se puede destruir el transistor. Este dato aparece en las hojas de características del componente. Así, por ejemplo, el transistor BC 107 posee una T_j (máx) de 175 °C.

La potencia máxima a que puede trabajar un transistor también depende de la temperatura ambiente. Hay que tener en cuenta que el calor producido en las uniones se conduce a través del encapsulado del transistor y se disipa al aire que lo rodea. Cuanto mayor sea la temperatura de este aire (temperatura ambiente), peor será la ventilación del transistor y, por tanto, menor la potencia máxima que se le puede exigir.

Por lo general, en las hojas técnicas se indica la potencia máxima para una temperatura ambiente de 25 °C.

En el caso de que la temperatura ambiente fuese superior, habría que encontrar la potencia máxima de funcionamiento para que el transistor trabaje dentro de sus límites de temperatura admisibles. En algunas hojas de especificaciones técnicas aparece una curva de relación, como la que se muestra en la Figura 9.24.

La curva de la Figura 9.24 nos indica que para una temperatura ambiente de 25 °C la potencia máxima es de 125 mW. Sin embargo, para 55 °C, la potencia disminuye a 50 mW.

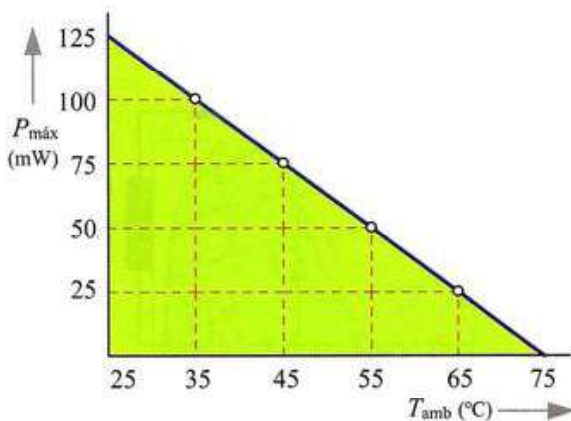


Figura 9.24 Relación de la potencia máxima de un transistor con la temperatura ambiente.

Aletas de refrigeración

En el caso de que se desee aumentar la potencia de un transistor, se puede acoplar un disipador de calor, o aleta de refrigeración en la superficie de la cápsula. De esta forma

se consigue que el calor se evacúe con mayor facilidad hacia el aire exterior. En otras ocasiones se une, mediante tornillos, la cápsula del transistor con el chasis, que en este caso actúa como disipador de calor, por tener una gran superficie (Figura 9.25).

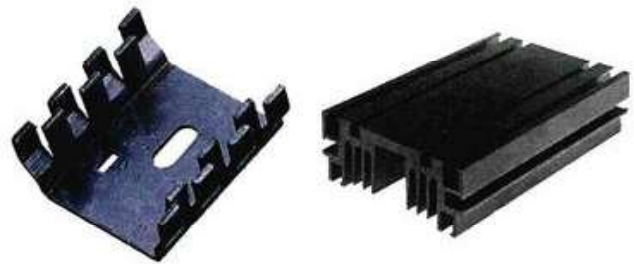


Figura 9.25. Aletas de refrigeración.

9.7.3. Recta de carga de un transistor

En apartados anteriores hemos estudiado el comportamiento de un transistor en todas sus posibilidades de funcionamiento mediante las curvas características. Pero, ¿cómo se comportaría este en el caso de que trabaje con una determinada resistencia de carga R_L ? La solución está en trazar una línea de carga en las curvas de colector para poder determinar los puntos de funcionamiento.

En la Figura 9.26 se muestra un transistor NPN en configuración de emisor común. Para determinar la corriente que circula por el colector, podemos aplicar la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia de carga R_L . La tensión aplicada a esta resistencia se corresponderá con la tensión total aplicada por la fuente V_{CC} menos la caída de tensión que se produce entre el colector y el emisor V_{CE} . De esta manera obtendremos la siguiente expresión, que se corresponderá con la ecuación de la recta de carga:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L}$$

Para dibujar esta recta sobre la curva característica, tal como se muestra en la Figura 9.27, lo primero que hay que hacer es encontrar sus extremos ($I_C = 0$ y $V_{CE} = 0$):

Para $V_{CE} = 0$, $I_C = \frac{V_{CC} - 0}{R_L} \rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_L}$

Para $I_C = 0$, $0 = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L} \rightarrow V_{CE} = V_{CC}$

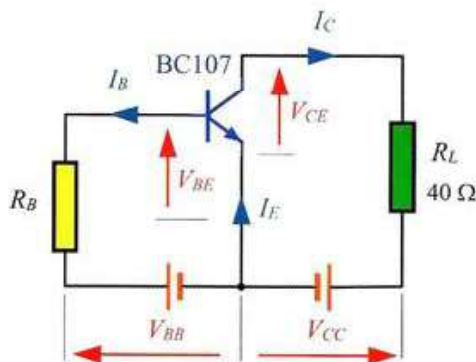


Figura 9.26. Transistor NPN en emisor común.

Llevando estos valores a las curvas características de colector, obtenemos la recta de carga de la Figura 9.29 para una determinada resistencia de carga R_L y una tensión de fuente V_{CC} .

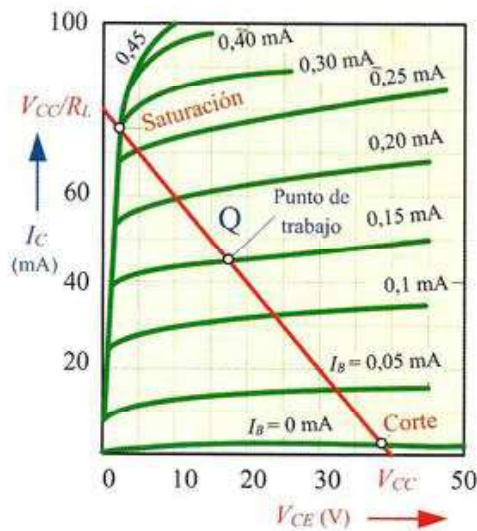


Figura 9.27. Recta de carga de un transistor.

A lo largo de la recta de carga se pueden distinguir tres partes fundamentales: punto de corte, punto de saturación, punto de trabajo.

El punto de corte es donde la línea de carga corta a la curva correspondiente a la corriente de base igual a cero ($I_B = 0$). Dada la escasa polarización directa a que queda sometido el diodo de emisor-base, la corriente que aparece por el colector es prácticamente nula (solo circula una pequeñísima corriente de fuga I_{CEO}). Haciendo una aproximación, se puede decir, sin equivocarse mucho, que el

punto de corte se da en la intersección de la recta de carga con el eje horizontal, es decir, cuando:

$$V_{CE \text{ corte}} \cong V_{CC}$$

El punto de saturación aparece donde la línea de carga corta a la intensidad de base de saturación (Figura 9.27). En este punto la corriente de colector es la máxima que se puede dar para la operación del transistor, dentro de los límites de la recta de carga. Haciendo una aproximación, se puede decir que el punto de saturación aparece en la intersección de la recta de carga con el eje vertical, es decir, cuando:

$$I_{C \text{ saturación}} \cong \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Para corrientes de base superiores a la de saturación se produce también el efecto de saturación en el transistor.

El punto de trabajo es aquel en donde el transistor trabaja de una forma normal y que, habitualmente, se encuentra entre la zona de corte y saturación. Para determinar el punto de trabajo (Q) del transistor para una determinada corriente de base (I_B), se busca el punto de intersección de la recta de carga con la curva correspondiente a dicha corriente de base.

Actividad resuelta 9.3

Se trata de determinar la recta de carga para el circuito de la Figura 9.28 y determinar el punto de trabajo del transistor para una corriente de base de 0,15 mA, así como los puntos de corte y saturación.

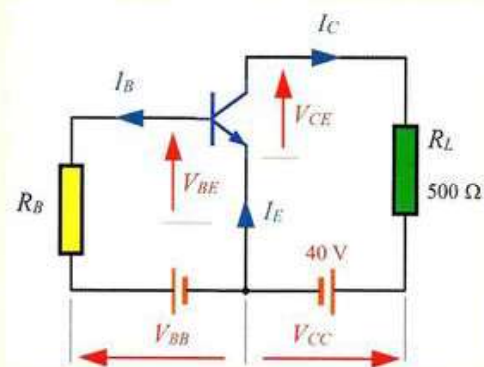


Figura 9.28.

Solución: Suponiendo que la familia de curvas de colector del transistor es la que se expone en la Figura 9.27, el punto de corte de la línea de carga con el eje horizontal ($I_C = 0$) vendrá determinado por:

$$V_{CE} = V_{CC} = 40 \text{ V}$$

El punto de corte de la línea de carga con el eje vertical ($V_{CE} = 0$) será entonces:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{40}{500} = 0,080 \text{ A} = 80 \text{ mA}$$

Llevando estos valores a las curvas de la Figura 9.27, dibujamos la línea de carga.

El punto Q de trabajo del transistor para una corriente de base de 0,15 mA será el que determine la intersección de la recta de carga con la curva de dicha corriente, habiendo resultado los siguientes valores ($I_C = 45 \text{ mA}$, $V_{CE} = 17 \text{ V}$).

El punto de corte (el transistor se comporta como un interruptor abierto, $I_C \approx 0$) se da cuando la tensión de colector-emisor es de 40 V.

El punto de saturación del transistor (cuando se llega a este extremo de funcionamiento el transistor se comporta como un interruptor cerrado, con lo que no responde en ningún caso a las variaciones de la corriente de base; $I_C = \text{máx}$) se da cuando la corriente de colector es 80 mA y la corriente de base es superior a 0,45 mA.

Por último, hay que indicar que cuando se diseña un circuito para un transistor hay que procurar que el transistor nunca opere por encima de la curva de potencia máxima. Esto se consigue seleccionando valores adecuados de la tensión de fuente V_{CC} y de la resistencia de carga R_L , de tal forma que la recta de carga trazada con estos esté siempre por debajo de la curva de potencia máxima. En la Figura 9.29 se muestra un ejemplo al respecto.

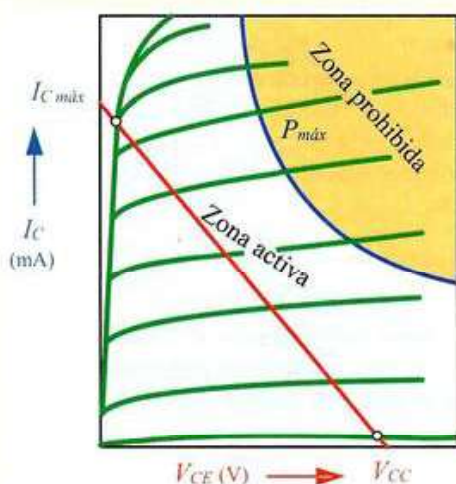


Figura 9.29. Zona de trabajo del transistor.

9.7.4. Hoja de características de un transistor

Partiendo de la hoja de características del transistor BC546 vamos a analizar los principales parámetros que figuran en las mismas.

En la Figura 9.30 se muestra el encapsulado del transistor. Se observa que se fabrica con la encapsulado TO-92, que es NPN y que las hojas de características se dan para la gama BC546 a BC550.

BC546/547/548/549/550

Switching and Applications

- High Voltage: BC546, $V_{CEO}=65\text{V}$
- Low Noise: BC549, BC550
- Complement to BC556 ... BC560



TO-92

1. Collector 2. Base 3. Emitter

NPN Epitaxial Silicon Transistor

Figura 9.30. Encapsulado.

Como se puede observar, del recorte extraído de las hojas de características de la Figura 9.31, para el transistor BC546 la tensión inversa colector-base (V_{CBO}) es de 80 V, la tensión inversa colector-emisor (V_{CEO}) es de 65 V y la tensión inversa emisor-base (V_{EBO}) de 6 V. La corriente máxima por el colector es de 100 mA y la potencia máxima de 500 mW.

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ\text{C}$				
Symbol	Parameter	Value	Units	
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	: BC546	80	V
		: BC547/550	50	V
		: BC548/549	30	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	: BC546	65	V
		: BC547/550	45	V
		: BC548/549	30	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	: BC546/547	6	V
		: BC548/549/550	5	V
I_C	Collector Current (DC)	100	mA	
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW	
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$	

Figura 9.31. Valores máximos.

Del recorte de la Figura 9.32 se deduce que la ganancia de corriente se encuentra entre 100 y 800, que la tensión base

emisor que hay que aplicar para poner el transistor en saturación es de 900 mV (en este caso, la intensidad por la base es de 5 mA y la corriente por el colector llega a 100 mA, que se corresponde con la máxima).

Electrical Characteristics $T_B=25^\circ\text{C}$					
Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max. Units
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB}=30\text{V}, I_E=0$			15 nA
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$	110		800
$V_{CE}(\text{sat})$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$ $I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$	90	250	200 600 mV
$V_{BE}(\text{sat})$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$ $I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$	700	900	mV
$V_{BE}(\text{on})$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$ $V_{CE}=5\text{V}, I_C=10\text{mA}$	580	660	700 720 mV

Figura 9.32. Características eléctricas.

En la Figura 9.33 se muestran las curvas características de la familia de colector.

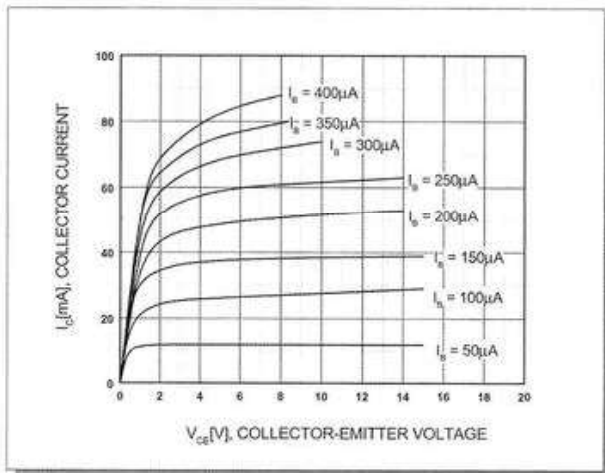


Figura 9.33. Curvas características de la familia de colector.

9.8. Polarización del transistor

Para conseguir que un transistor funcione adecuadamente, dentro de los límites indicados en el diseño, es preciso polarizarlo correctamente.

Polarizar un transistor consiste en suministrar las tensiones adecuadas de alimentación y conectar resistencias en el circuito con los valores oportunos, de forma que la señal introducida a la entrada del circuito no resulte deformada a la salida.

En la Figura 9.34 se muestra el ejemplo de un transistor NPN con polarización mediante dos fuentes de alimentación.

Aquí se ha conectado el transistor en configuración emisor común. La tensión V_{BB} que proporciona la fuente de 1,5 V polariza directamente la unión base-emisor a través de la resistencia de polarización R_B . Por otro lado, la fuente de 4 V proporciona la tensión V_{CC} que polariza inversamente el colector a través de la resistencia R_C . El objetivo que se persigue es determinar los valores de la resistencia R_C y los de la resistencia R_B para que la polarización del transistor sea correcta, o sea, para que la forma de señal introducida a la entrada del circuito no resulte deformada a su salida.

En un amplificador la señal de entrada suele ser de carácter variable, por ejemplo, la señal eléctrica de un micrófono o la aguja de un tocadiscos.

El condensador C_1 de la Figura 9.34 sirve para acoplar la entrada al transistor. Este condensador elimina la componente de corriente continua que pudiera aparecer en la señal de entrada.

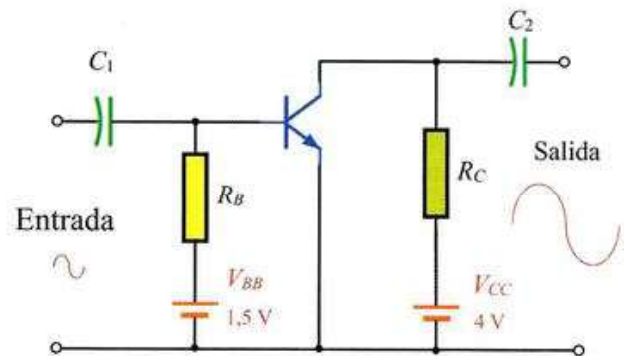


Figura 9.34. Polarización de transistor NPN mediante dos fuentes de alimentación.

La resistencia de polarización de base R_B se elige de forma que la corriente de base sea pequeña y de un valor determinado. La resistencia de carga del colector hace posible que entre el colector y el emisor aparezca una tensión variable en la salida.

Actividad resuelta 9.4

Seguidamente resolveremos el circuito presentado en la Figura 9.34 y trazaremos la recta de carga para determinar el punto de trabajo idóneo del transistor.

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff en la malla del colector obtendremos la siguiente ecuación:

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$$

Para determinar los puntos de intersección de la recta de carga con los ejes de coordenadas de V_{CE} e I_C de las curvas características de colector, se procede como en otras ocasiones:

Para $I_C = 0 \rightarrow V_{CE\text{máx}} = V_{CC}$ (punto de corte)

Para $V_{CE} = 0 \rightarrow I_{C\text{máx}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$ (punto de saturación)

Para el circuito que se mostró como ejemplo en la Figura 9.34, el punto de corte de la recta de carga se da para el valor de $V_{CE} = V_{CC} = 4 \text{ V}$.

Para encontrar el valor adecuado de $I_{C\text{máx}}$ habrá que observar las curvas características de colector del transistor, que se corresponden con las indicadas en la Figura 9.35, de tal forma que la recta de carga a trazar no sobrepase en ningún caso a la curva de potencia máxima. En caso contrario entraríamos en la zona prohibida de funcionamiento del transistor, con riesgo de destrucción de este por sobrecalentamiento. Según estos consejos y observando detenidamente las curvas de la Figura 9.35, se ha seleccionado una corriente de colector de 100 mA para el punto de saturación de la recta de carga.

Una vez determinados los puntos de corte y saturación ($V_{CE} = 4 \text{ V}$, $I_C = 100 \text{ mA}$) se dibuja la recta de carga.

Ya podemos determinar el valor R_C :

$$I_{C\text{máx}} = \frac{V_{CC}}{R_C} \rightarrow R_C = \frac{V_{CC}}{I_{C\text{máx}}} = \frac{4}{0,100} = 40 \Omega$$

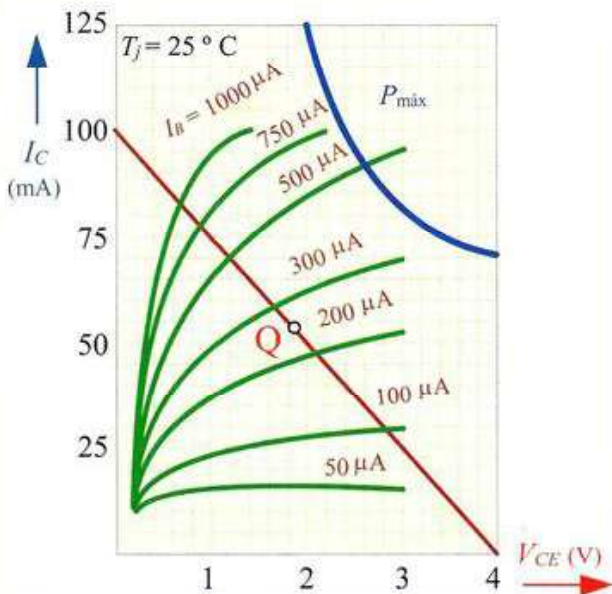


Figura 9.35. Determinación de $I_{C\text{máx}}$ mediante las curvas características.

Una vez hecho esto, ya solo nos falta determinar la resistencia de polarización R_B para un determinado punto de trabajo del transistor.

El punto de trabajo del transistor debe situarse aproximadamente en el centro de la recta de carga (equidistante de la zona de corte y de la de saturación). Recuerda que en el punto de saturación ($I_{C\text{máx}}$) el transistor se comporta como un interruptor cerrado, no respondiendo a las variaciones de la corriente de base; y que en el punto de corte ($V_{CE\text{máx}}$) el transistor se comporta como un interruptor abierto, y la corriente por el colector es aproximadamente igual a cero.

En el ejemplo que nos ocupa, se ha fijado el punto de trabajo para una corriente de base de $250 \mu\text{A}$, tal como se puede apreciar en la Figura 9.35.

La razón por la cual se fija el punto de trabajo Q en el centro de la recta de carga es muy simple: téngase en cuenta que la señal que se aplica por la base para ser amplificada es variable y, por tanto, habrá que procurar que esta corriente no llegue a las zonas de corte y saturación del transistor. En caso contrario, se podría distorsionar la señal de salida.

Para entender mejor esta idea, a continuación se muestran tres formas en las que puede llegar a trabajar un amplificador con transistores.

En el ejemplo mostrado en la Figura 9.36 el punto de funcionamiento que se ha seleccionado se encuentra muy próximo al punto de saturación del transistor, por lo que se produce un recortamiento o distorsión en la señal de salida, al variar la corriente de base según la señal de entrada aplicada.

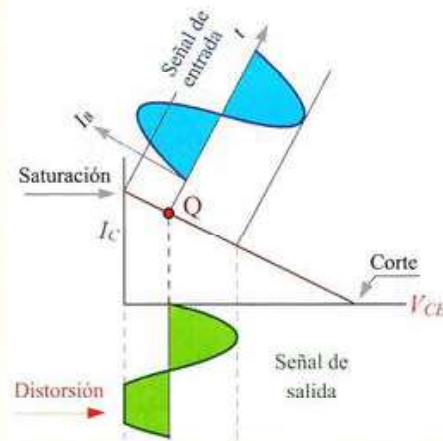


Figura 9.36. Distorsión de la señal de salida por saturación.

En el ejemplo de la Figura 9.37 se ha optado por un punto de trabajo muy próximo al punto de corte, por lo que también se produce distorsión en la señal de salida.

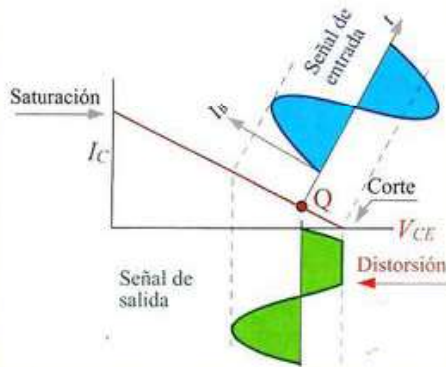


Figura 9.37. Distorsión en la salida por proximidad a la zona de corte.

En el ejemplo mostrado en la Figura 9.38 el punto de funcionamiento que se ha seleccionado parece el correcto, ya que no se produce distorsión en la señal de salida, al variar la corriente de base según la señal de entrada aplicada.

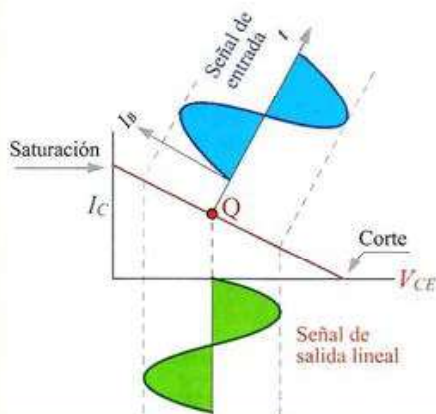


Figura 9.38. Señal sin distorsión.

Volviendo al ejemplo de aplicación que estamos resolviendo, ahora tenemos que calcular el valor de la resistencia de base R_B para que la corriente de base I_B sea de $250 \mu\text{A}$. Para ello aplicamos la segunda ley de Kirchoff a la malla de la base del circuito de la Figura 9.39:

$$V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE}$$

de esta expresión se deduce que:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B}$$

Tomando como valor aproximado la tensión de polarización directa del diodo emisor $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$, la resistencia de polarización será igual a:

$$R_B = \frac{1,5 - 0,7}{250 \cdot 10^{-6}} = 3.200 \Omega$$

En la práctica escogeremos valores comerciales para las resistencias calculadas, siendo $R_B = 3,3 \text{ k}\Omega$ y $R_C = 39 \Omega$.

El punto de funcionamiento del transistor, polarizado de esta manera, varía excesivamente con β y con la temperatura, por lo que esta forma de polarización no es muy adecuada para los transistores que trabajan de una forma lineal.

9.8.1. Polarización del transistor por realimentación del emisor con divisor de tensión

A este tipo de polarización también se la denomina universal y es la que más se emplea en circuitos lineales de amplificación. En la Figura 9.39 se indica el esquema correspondiente a un circuito de polarización universal. Observa cómo existe un divisor de tensión formado por R_1 y R_2 . La tensión que aparece en R_2 es la que polariza directamente la unión base-emisor. Este circuito constituye un buen amplificador lineal y responde muy bien a las pequeñas variaciones de β , y además es estable entre amplios márgenes de temperatura.

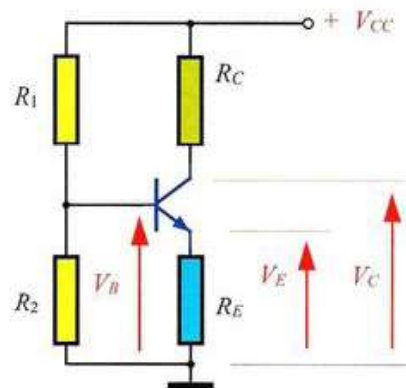


Figura 9.39. Polarización por divisor de tensión.

Actividad resuelta 9.5

Seguidamente, vamos a analizar las magnitudes que se dan en un circuito de este tipo. Para ello resolveremos el circuito ejemplo que se muestra en la Figura 9.40, para encontrar el punto aproximado de funcionamiento del transistor.

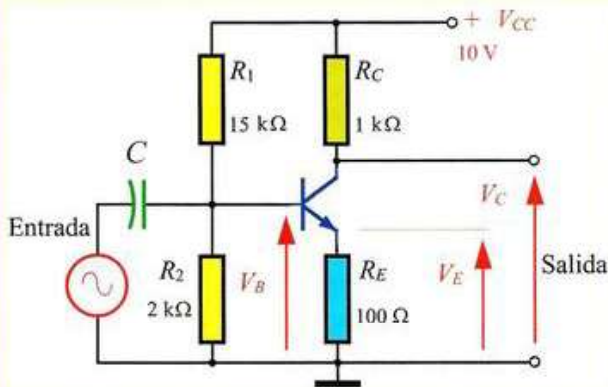


Figura 9.40.

El primer paso es determinar la caída de tensión que aparece en la resistencia de base R_2 . A esta tensión se la conoce por el nombre de tensión de base V_B (tensión de la base respecto a masa). Para ello, vamos a despreciar el pequeño valor de la corriente de base que atraviesa R_1 . En este caso, la corriente que fluye por R_2 estará delimitada por V_{CC} y la suma de R_1 y R_2 :

$$I = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

Si ahora aplicamos la ley de Ohm entre los extremos de R_2 , tendremos que:

$$V_B = R_2 \cdot I$$

Sustituyendo este valor en la primera ecuación, tendremos que:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

Si ahora aplicamos los valores correspondientes al circuito de nuestro ejemplo, resultará que:

$$V_B = \frac{2.000}{15.000 + 2.000} \cdot 10 = 1,176 \text{ V}$$

Para calcular la tensión V_E que aparece en el emisor (tensión del emisor respecto a masa), aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a la malla correspondiente:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

Dado que estamos trabajando con un transistor de silicio, se puede suponer con aproximación que la tensión de polarización directa del diodo emisor-base es de unos 0,7 V. Aplicando estos valores a la última ecuación concluida, tendremos que:

$$V_E = 1,176 - 0,7 = 0,476 \text{ V}$$

Aplicando la ley de Ohm a la resistencia de emisor R_E , podremos calcular la corriente de emisor I_E :

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{0,476}{100} = 4,76 \text{ mA}$$

Dado que la intensidad de base es muy pequeña se puede suponer que las intensidades de colector y emisor son iguales:

$$I_C \approx I_E \quad , \quad I_C = 4,76 \text{ mA}$$

A continuación, calcularemos la tensión que aparece en el colector V_C (tensión de colector respecto a masa), que será igual a la tensión V_{CC} de la fuente de alimentación menos la caída de tensión ($R_C \cdot I_C$) que aparece en R_C :

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - (1.000 \cdot 0,00476) = 5,24 \text{ V}$$

Por último, calcularemos la tensión que aparece entre el colector-emisor, la cual nos indicará el punto de trabajo del transistor. Esta tensión será igual a la diferencia de tensiones que aparece entre el colector y el emisor, es decir:

$$V_{CE} = V_C - V_E = 5,24 - 0,476 = 4,76 \text{ V}$$

Observa cómo la tensión V_{CE} ha quedado a un valor muy próximo a la mitad de la tensión de alimentación ($V_{CC} = 10 \text{ V}$). Esto significa que el punto Q de trabajo se encontrará aproximadamente en la mitad de la recta de carga, lo cual nos indica que el transistor trabaja en un punto estable de operación.

Conviene resaltar el hecho de que se han utilizado, para este circuito, las tensiones de base V_B , emisor V_E y colector V_C respecto a masa. El conocimiento de estas tensiones es siempre muy útil para la localización de las averías en un circuito, dada la facilidad con la que se pueden medir y contrastar con las originales aportadas por el diseñador.

9.9. Fototransistores

Al igual que ocurría con los diodos fotoemisores, también se fabrican transistores que son sensibles a la radiación luminosa; nos referimos a los fototransistores.

En la Figura 9.41 se puede apreciar el símbolo del fototransistor.

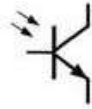


Figura 9.41. Símbolo del fototransistor.

El fototransistor se fabrica de tal forma que pueda llegar la luz hasta el cristal de la base. Cuando esto ocurre, se produce un aumento de portadores minoritarios que hacen que fluya una corriente eléctrica desde el emisor al colector. El valor de esta corriente depende de la intensidad de la radiación luminosa que incide en la base, tal como se puede apreciar en las curvas características de colector de la Figura 9.42.

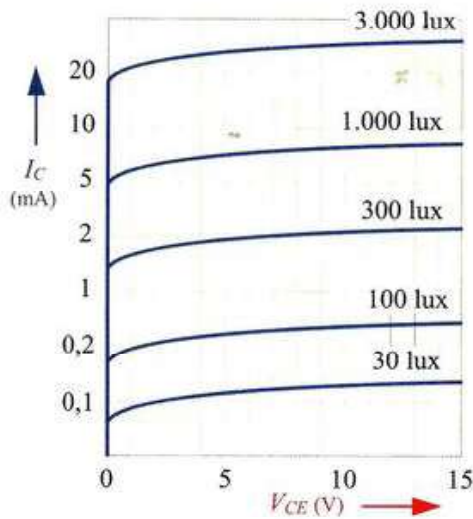


Figura 9.42. Curvas de colector de un fototransistor.

Dado que los fototransistores son más sensibles que los fotodiodos, ya que pueden producir una cierta amplificación de la señal luminosa aplicada a su base, se utilizan mucho más frecuentemente en la fabricación de optoacopladores. En la Figura 9.43 se puede apreciar la estructura de un circuito optoacoplador en el que se combinan las propiedades de un diodo fotoemisor con las de un fototransistor.

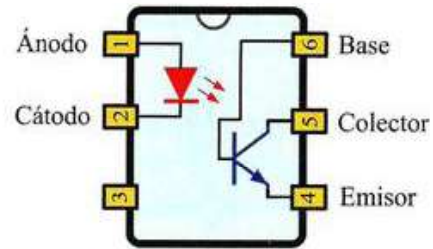


Figura 9.43. Optoacoplador con fototransistor.

En la Figura 9.44, se expone el circuito de un optoacoplador con fototransistor. La señal de entrada produce en el fotodiodo una radiación luminosa dependiente de la intensidad de corriente de dicha señal. Esta radiación incide en la base del fototransistor, lo que produce una señal en la salida que es proporcional a la aplicada a la entrada. Esta transferencia de la señal se realiza sin la intervención de ningún contacto eléctrico, por lo que se consigue aislar eléctricamente los circuitos de entrada y salida.

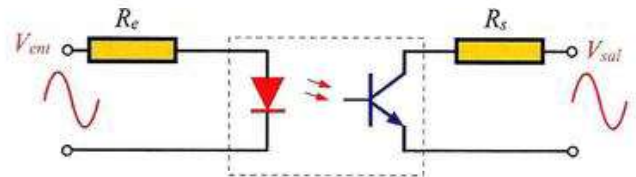


Figura 9.44. Circuito de optoacoplador con transistor.

Prácticas de laboratorio

9.1. Identificación de transistores mediante polímetro digital. Consigue varios transistores y comprueba con el polímetro digital cuáles son NPN y cuáles son PNP, así como la disposición de sus terminales.

Para poder llevar a cabo esta tarea con éxito tendrás que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Sitúa el selector del polímetro digital en el campo para medir diodos. Recuerda que en esta posición, el polímetro muestra en la pantalla digital la tensión de barrera directa.

En un transistor en buen estado, entre los terminales de colector y emisor no aparece ninguna tensión de polarización. En cualquier orden en el que pongamos las puntas de prueba entre estos dos terminales, el polímetro indicará «1», tal como se muestra en la Figura 9.45.

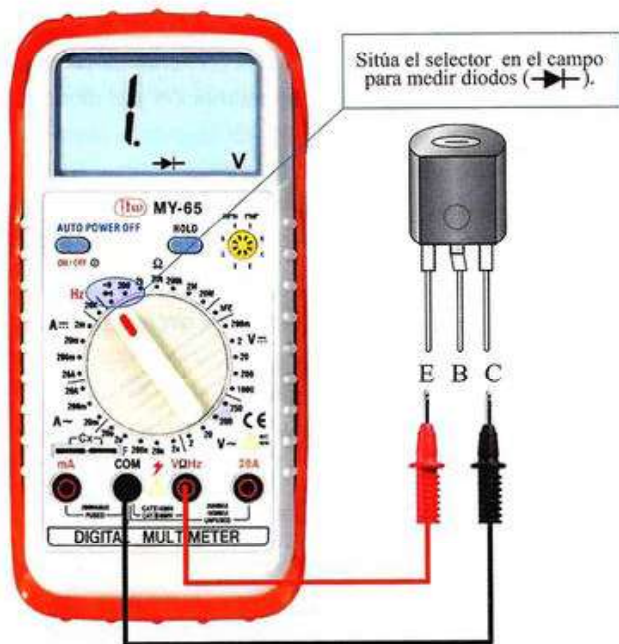


Figura 9.45. Entre el emisor y el colector no hay polarización.

Si colocamos la punta roja en la base y la negra en el emisor, para un transistor NPN en buen estado el polímetro indicará la tensión de barrera directa del diodo base-emisor. En el ejemplo de la Figura 9.46, indica que este valor es de 0,75 V.

Para un transistor PNP habría que cambiar el orden de las puntas de prueba para obtener el mismo resultado.



Figura 9.46. Polarización base emisor.

Si colocamos la punta roja en la base y la negra en el colector, para un transistor NPN en buen estado el polímetro indicará la tensión de barrera directa del diodo base-colector. En el ejemplo de la Figura 9.47, indica que



Figura 9.47. Polarización base colector.

este valor es de 0,745 V. Observa cómo la tensión de barrera en el diodo base-colector es algo inferior al de base-emisor. Esto nos servirá para definir cuál es el terminal emisor y cuál es el de colector.

Una vez hecho esto conéctalos al transistorómetro y determina la ganancia de corriente β . En el ejemplo de la Figura 9.48, el polímetro indica una ganancia de 476.



Figura 9.48. Medida de la ganancia de corriente.

9.2. Interruptor crepuscular. Se trata de realizar un circuito que sea capaz de activar una lámpara cuando el nivel de iluminación se reduce hasta valores propios de la oscuridad de la noche. Este circuito es muy útil para el encendido automático del alumbrado público en los cambios de día-noche. En la Figura 9.49 se muestra el esquema correspondiente al circuito en cuestión.

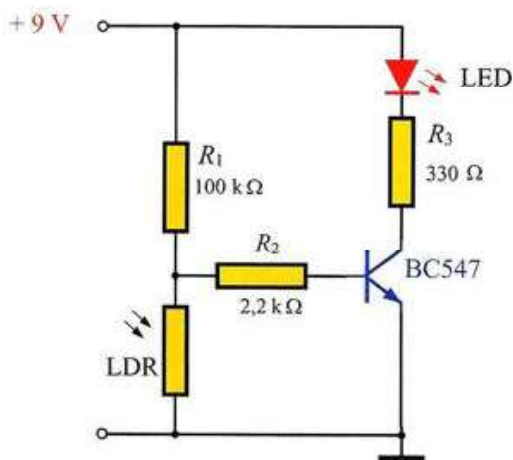


Figura 9.49. Circuito de un interruptor accionado por la luz.

A parte de la resistencia de polarización, para su montaje necesitaremos:

- Una LDR, que es la que va a hacer las veces de sensor luminoso.
- Un transistor BC 547 o similar, que es el que va a ser capaz de aportar la suficiente corriente para excitar iluminar el diodo LED.
- Un diodo LED que va a representar el alumbrado público.

El funcionamiento de este circuito es muy sencillo; en presencia de luz la LDR posee una resistencia relativamente baja, por lo que en el divisor de tensión, formado por R_1 y la LDR, la mayor parte de la tensión aparece en los extremos de la resistencia R_1 , quedando muy poca tensión en la LDR, por lo que el transistor recibe una tensión de base muy reducida e insuficiente para polarizarlo. El transistor está en corte y el diodo LED no luce.

Por el contrario, en el caso de que en LDR reciba una cantidad de luz suficiente, su valor óhmico aumenta y también lo hace la tensión en sus extremos, consiguiendo polarizar al transistor con una corriente de base suficiente para que este entre en saturación y el diodo LED se encienda.

Monta el circuito propuesto en la Figura 9.49 y comprueba su funcionamiento. Una vez montado el circuito y comprobado su funcionamiento, contesta a las siguientes cuestiones:

- Mide las diferentes tensiones del circuito para distintos niveles de iluminación. ¿En qué condiciones trabaja el transistor en corte y en saturación?
- ¿Qué tipo de polarización se ha empleado en el circuito?
- ¿Qué dispositivo hace las veces de resistencia de carga del transistor?

9.3. Circuito de encendido por presencia de luz. Se trata de conseguir que un diodo LED se encienda a través de un transistor cuando la luz que incide en una LDR se hace intensa (Figura 9.50).

El circuito funciona a la inversa que el anterior: en presencia de luz la LDR posee una resistencia relativamente baja, por lo que en el divisor de tensión, formado por R_1 y la LDR, la mayor parte de la tensión aparece en los extremos de la resistencia R_1 , quedando muy poca tensión en la LDR, por lo que el transistor recibe una tensión de base suficiente para polarizarlo. El transistor está saturación y el diodo LED luce.

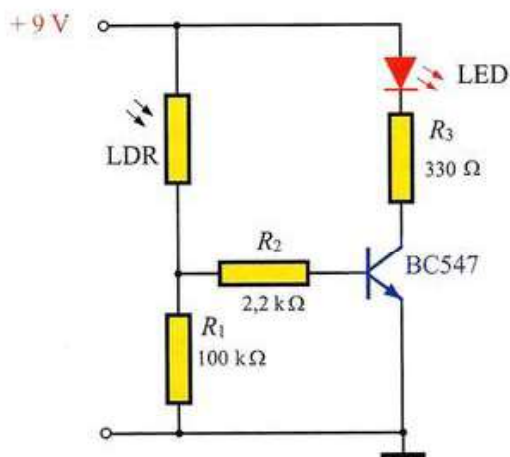


Figura 9.50. Circuito de encendido por presencia de luz.

Por el contrario, en el caso de que en LDR reciba una cantidad de luz insuficiente, su valor óhmico aumenta y también lo hace la tensión en sus extremos, quedando muy poca tensión en la R_1 , por lo que el transistor recibe una tensión de base muy reducida e insuficiente para polarizarlo. El transistor está en corte y el diodo LED no luce.

Monta el circuito de la Figura 9.50 y comprueba las diferentes magnitudes que se dan en él mediante el polímetro en ausencia y presencia de luz.

- 9.4. Circuito temporizador a la desconexión.** Se trata de conseguir que un diodo LED se encienda a través de un transistor cuando accionemos un pulsador, y que permanezca encendido solamente durante el tiempo predeterminado por un circuito temporizador construido a base de una red RC (Figura 9.51).

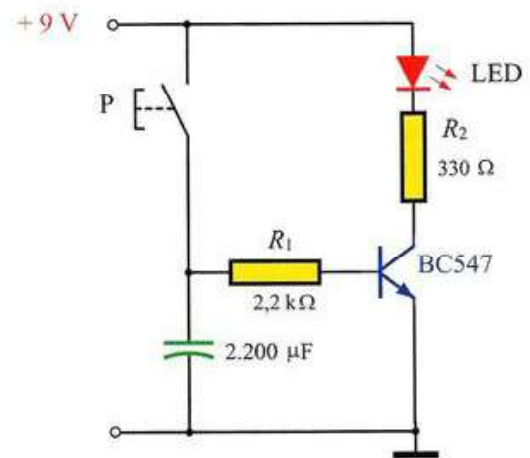


Figura 9.51. Circuito de temporizador a la desconexión de luz.

El funcionamiento de este circuito es así: dado que en un principio, no existe corriente por la base del transistor, el transistor permanece en corte y el diodo LED está apagado. Al cerrar el pulsador P, el condensador se carga y toda la tensión aparece en la base del transistor, por lo que este se polariza y el diodo LED se enciende.

En el momento que soltamos el pulsador, el condensador se descarga a través de la resistencia de base R_1 y la base del transistor durante un tiempo. Una vez descargado el condensador, el transistor entra en corte y el diodo LED se apaga. El tiempo de retardo de la desconexión será mayor cuanto mayor sea la capacidad del condensador.

Monta el circuito y comprueba las diferentes magnitudes que se dan en él mediante el polímetro al accionar el pulsador.

Actividades de comprobación

- 9.1. ¿Qué ocurre con la corriente de colector al aumentar la tensión de polarización directa V_{BE} aplicada entre la base y el emisor de un transistor?
- Aumenta.
 - Disminuye.
 - Se mantiene constante.
- 9.2. ¿Qué ocurre con la corriente de colector al disminuir la corriente de base de un transistor?
- Aumenta.
 - Disminuye.
 - Se mantiene constante.
- 9.3. ¿Cómo debe ser la resistencia que presenta un transistor en buen estado entre su colector y su emisor?
- Alta.
 - Baja.
 - Nula.
- 9.4. ¿Cuál de las corrientes de un transistor es más elevada?
- La del emisor.
 - La de la base.
 - Son todas iguales.
- 9.5. El parámetro β de un transistor relaciona
- La corriente de base y del emisor.
 - La corriente de base y del colector.
 - Las tensiones de base.
- 9.6. En un transistor se ha medido una variación de corriente de colector de 98 mA y una variación de 100 mA en la corriente de emisor. Teniendo en cuenta que en un transistor se cumple que $I_E = I_C + I_B$, determina el parámetro β .
- 9.7. ¿Qué significan las siglas V_{CBO} y V_{CEO} en un transistor? Indica las relaciones correctas.
- V_{CBO} = Tensión directa colector-base con el colector abierto.
 - V_{CEO} = Tensión inversa colector-emisor con la base abierta.
 - V_{CBO} = Tensión inversa colector-base con el emisor abierto.
- 9.8. En un circuito con transistor montado en configuración emisor común, ¿cuál es el electrodo donde se aplica la señal de entrada y por cuál aparece la salida?
- Entrada a la base y colector a la salida.
 - Entrada al emisor y colector a la salida.
 - Entrada a la base y emisor a la salida.
- 9.9. Indica cuál de las siguientes afirmaciones es cierta:
- En un transistor, con pequeñas modificaciones de la corriente de base, se consiguen grandes variaciones en la corriente de colector.
 - Cuando un transistor trabaja en la zona de saturación, los aumentos de corriente de base no producen aumentos en la corriente de colector.
 - Cuando un transistor trabaja en la zona de corte, se puede considerar que opera como si fuese un interruptor abierto.
 - Para que un transistor trabaje de una forma normal se polariza la unión base-emisor con tensión directa, mientras que la unión base-colector se hace con tensión inversa.
 - Conocida la curva de potencia máxima de un transistor, la zona prohibida se sitúa en la parte inferior de la misma.
- 9.10. ¿Cómo se puede conseguir aumentar la potencia de un transistor?
- No es posible.
 - Conectando un condensador entre la base y el emisor.
 - Uniéndolo a una aleta de refrigeración.
- 9.11. Determina la potencia máxima de un transistor si la corriente nominal de colector es de 50 mA y la tensión nominal de colector-emisor es de 5 V.
- 9.12. El transistor BC 548 posee una potencia máxima de 500 mW a $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$. ¿Cuál será la corriente máxima que podrá fluir por el colector si la tensión colector-emisor es de 5 V?
- 9.13. En la Figura 9.52 se muestra el circuito en configuración emisor común de un transistor. Valiéndose de las curvas de colector de la Figura 9.53, dibuja la recta de

carga y determina los valores de I_C , V_{CE} e I_B en el punto de corte, en el punto de saturación y en el punto de trabajo para $I_B = 300 \mu\text{A}$.

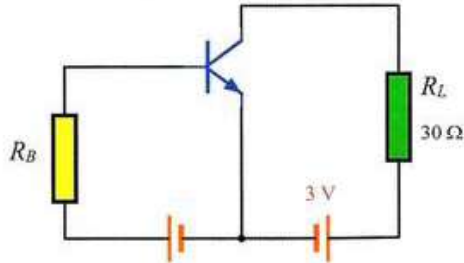


Figura 9.52.

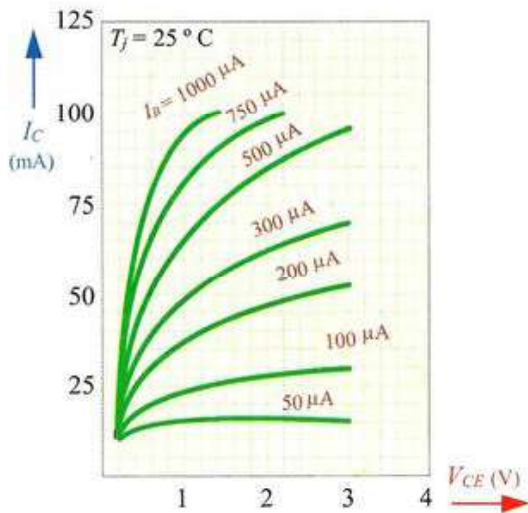


Figura 9.53.

9.14. Indica cuál de las siguientes afirmaciones es cierta:

- a) Cuando se diseña un circuito de polarización de un transistor conviene que el punto de trabajo del transistor quede fijado en las proximidades del centro de la recta de carga.
- b) La polarización de un transistor en un circuito lineal debe fijar un punto de trabajo con el que se consiga distorsión en la señal de salida.
- c) Los aumentos de temperatura de un transistor hacen disminuir su ganancia de corriente.

9.15. En el caso de que el transistor que aparece en el circuito de la Figura 9.54 sea de silicio, determina la corriente de colector y la tensión colector-emisor, así como los valores de V_B , V_E y V_C .

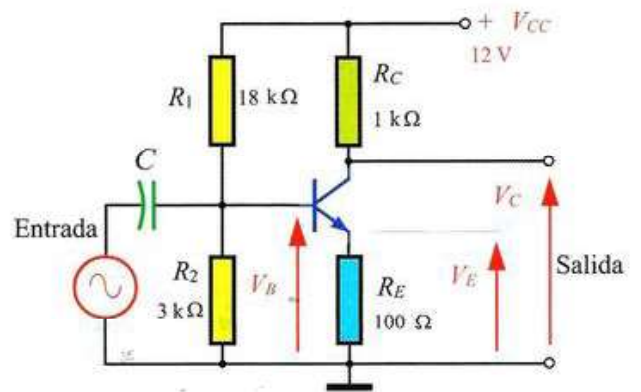


Figura 9.54.


Actividades de ampliación

9.1. Busca en Internet las hojas de características de algunos transistores de potencia y analiza los principales parámetros que figuran en las mismas, como por ejemplo: encapsulado, disposición de terminales, corriente máxima por el colector, potencia máxima, tensiones inversas, ganancia de corriente, etc.

A modo de ejemplo, en la Figura 9.55 se muestran unos recortes pertenecientes a la hoja de características del transistor de potencia 2N3055.

**NPN
2N3055**

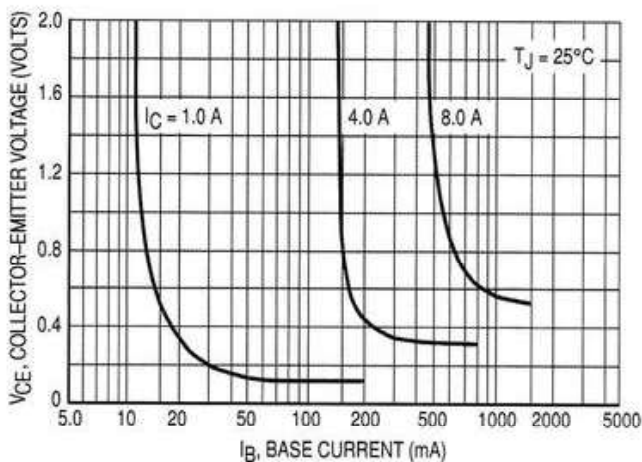
**15 AMPERE
POWER TRANSISTORS
COMPLEMENTARY
SILICON
60 VOLTS
115 WATTS**



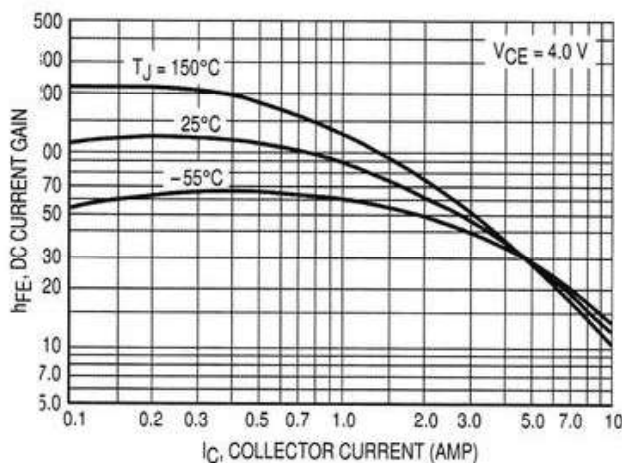
**CASE 1-07
TO-204AA
(TO-3)**

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	Vdc
Collector-Emitter Voltage	V_{CER}	70	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB}	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	7	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	15	Adc
Base Current	I_B	7	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	115 0.657	Watts W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200	$^\circ\text{C}$



Collector Saturation Region



DC Current Gain

Figura 9.55. Hoja de características del transistor de potencia 2N3055.