

## Prefacio

El objetivo del presente documento, electrónica I: teoría y práctica, continúa siendo proporcionar a los estudiantes una sólida base en los principios del análisis de circuitos y apoyar a los profesores en la tarea de la enseñanza, proporcionándoles un ebook en la modalidad campus virtual y una amplia variedad de herramientas de soporte. Desarrollado específicamente para los alumnos que cursen electrónica como introducción de análisis del amplio mundo de los circuitos, este libro ha sido escrito sobre todo para los estudiantes de tecnología electrónica del instituto universitario de tecnología para la información (IUTepi).

Abarca los fundamentos de circuitos Polarización del BJT, Circuitos Amplificadores en las Diferentes Configuraciones, Transistor de Efecto de Campo de Unión. Cuando los estudiantes completen de manera exitosa un curso basado en el contenido de este libro, tendrán un buen conocimiento práctico de los principios de los circuitos y una habilidad demostrada para resolver diversos problemas relacionados con ellos. El libro contiene 3 capítulos fundamentales, dividido en tres partes: Conceptos fundamentales y una breve reseña histórica, análisis básicos, simulación y guía de ejercicios

## Contenido del programa de estudios

- Introducción
- Polarización del BJT
- Circuitos Amplificadores en las Diferentes Configuraciones
- Transistor de Efecto de Campo de Unión.
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía

## Introducción

El análisis o diseño de un amplificador transistorizado requiere conocer la respuesta del sistema tanto de cd como de ca. Con frecuencia se supone que el transistor es un dispositivo mágico que puede elevar el nivel de la entrada de ca, sin la ayuda de una fuente de energía externa. En realidad, el nivel de potencia de ca de salida mejorada es el resultado de una transferencia de energía de las fuentes de cd aplicadas. El análisis o diseño de cualquier amplificador electrónico se compone, por consiguiente, de una parte de ca y una de cd. Por suerte, el teorema de superposición es aplicable y la investigación de las condiciones de cd puede separarse por completo de la respuesta de ca. Sin embargo, hay que tener en cuenta que durante la etapa de diseño o síntesis, la selección de los parámetros de los niveles de cd requeridos afectará la respuesta de ca, y viceversa.

Varios factores controlan el nivel de operación de cd de un transistor, entre ellos el intervalo de los posibles puntos de operación en las características del dispositivo. El intervalo para el amplificador de transistor de unión bipolar (BJT). Una vez que se han definido los niveles de corriente cd y voltaje deseados, se debe construir una red que establezca el punto de operación deseado. En este capítulo se analizan varias de estas redes. Cada diseño también determinará la estabilidad del sistema, es decir, cuán sensible es a las variaciones de la temperatura, otro tema que se investigará en una sección de la parte final de este capítulo. Aunque aquí analizaremos varias redes, hay una similitud subyacente en el análisis de cada configuración, debido al uso recurrente de las siguientes relaciones básicas importantes de un transistor:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B \cong I_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

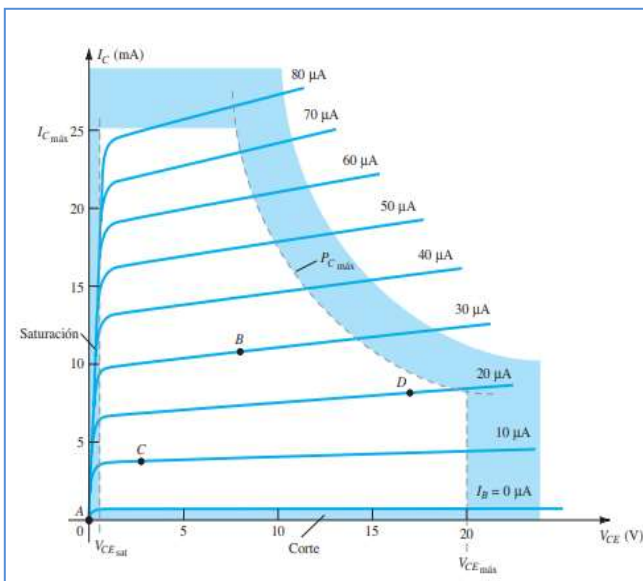
## Polarización del BJT

### Punto de operación

El término polarización que aparece en el título de este capítulo es un término totalmente inclusivo de la aplicación de voltajes de cd para establecer un nivel fijo de corriente y voltaje. Para amplificadores con transistores, la corriente y voltaje de cd resultantes establecen un punto de operación en las características que definen la región que se empleará para amplificar la señal aplicada. Como el punto de operación es un punto fijo en las características, también se llama punto quiescente (abreviado punto Q). Por definición, quiescente significa quieto, inmóvil, inactivo. La figura .una característica del dispositivo de la salida general para establecer la operación del dispositivo en cualquiera de estos u otros puntos dentro de la región activa. Las capacidades máximas se indican en las características por medio de una línea horizontal para la corriente máxima del colector y una línea vertical para el voltaje máximo de colector a emisor La curva define la restricción de potencia nominal máxima en la misma figura. En el extremo inferior de las escalas se encuentran la región de corte, definida.

El dispositivo BJT podría ser polarizado para que opere afuera de estos límites máximos, pero el resultado de tal operación acortaría considerablemente la duración del dispositivo o lo destruiría. Si nos limitamos a la región activa, podemos seleccionar muchas áreas o puntos de operación diferentes. A menudo, el punto Q seleccionado depende del uso pretendido del circuito. No obstante, podemos considerar algunas diferencias entre los varios puntos para presentar algunas ideas básicas sobre el punto de operación y, por ende, sobre el circuito de polarización.

Si no se utilizara polarización, al principio el dispositivo estaría totalmente apagado o inactivo, y el punto Q estaría en A, es decir, corriente cero a través del dispositivo (y voltaje cero a través de él). Como es necesario polarizar un dispositivo de modo que sea capaz de responder a todo el intervalo de una señal de salida, el punto A no sería adecuado. Para el punto B, si se aplica una señal al circuito, el dispositivo variará la corriente y el voltaje a partir del punto de operación, lo que permite que el dispositivo reaccione (y que posiblemente amplifique) tanto las excursiones positivas como las negativas de la señal de entrada. Si selecciona apropiadamente la señal de entrada, el voltaje y la corriente del dispositivo variarán, pero no lo suficiente para llevar al dispositivo a corte o saturación. El punto C permitiría alguna variación positiva y negativa de la señal de entrada, pero el valor pico a pico se vería limitado por la proximidad de  $V_{CE} 0\text{ V}$  e  $I_C 0\text{ mA}$ . La operación en el punto C también hace que surjan dudas con respecto a las no linealidades introducidas por el hecho de que la separación entre las curvas  $I_B$  cambia



Con rapidez en esta región. En general, es preferible operar donde la ganancia del dispositivo es bastante constante (o lineal) para garantizar que la amplificación a lo largo de toda la excursión de la señal de entrada sea la misma. El punto B es una región de más separación lineal, y por consiguiente de más operación lineal, El punto D sitúa el punto de operación cerca del nivel máximo de voltaje y potencia. El voltaje de salida incursiona en la dirección positiva, y por lo tanto se limita si no se excede el voltaje máximo. Por consiguiente, parece que el punto B es el mejor punto de operación en función de ganancia lineal y máxima excursión posible de voltaje y de corriente. En realidad, ésta es la condición deseada para amplificadores de señal pequeña aunque no necesariamente para amplificadores de potencia, En este análisis nos concentraremos principalmente en polarizar el transistor para operación de amplificación de señal pequeña.

Hay que considerar otro factor de polarización muy importante. Habiendo seleccionado y polarizado el BJT en un punto de operación deseado, también debemos tomar en cuenta el efecto de la temperatura. La temperatura cambia los parámetros del dispositivo al igual que la ganancia de corriente del transistor y su corriente de fuga (ICEO). Las altas temperaturas incrementan las corrientes de fuga en el dispositivo, y cambian por lo tanto las condiciones de operación establecidas por la red de polarización. El resultado es que el diseño de la red también debe proporcionar un grado de estabilidad de temperatura, de modo que los cambios ambientales produzcan cambios mínimos en el punto de operación. Este mantenimiento del punto de operación puede ser especificado por un factor de estabilidad  $S$ , el cual indica el grado de cambio del punto de operación provocado por una variación de la temperatura. Es deseable un circuito altamente estable, y se comparará la estabilidad de algunos circuitos de polarización básicos.

**Para que el BJT se polarice en su región de operación lineal o activa lo siguiente debe ser cierto:**

1. La unión base-emisor debe polarizarse en directa (voltaje más positivo en la región p), con el voltaje de polarización en directa resultante de cerca de 0.6 a 0.7 V.
2. La unión base-colector debe polarizarse en inversa (más positivo en la región n), con el voltaje de polarización en inversa de cualquier valor dentro de los límites del dispositivo.

[Observe que para la polarización en directa el voltaje a través de la unión p-n es p positivo, en tanto que para la polarización en inversa es opuesto (inverso) con n positiva. Este énfasis en la letra inicial deberá servir para memorizar la polaridad necesaria del voltaje.]

**La operación en las regiones de corte, saturación y lineal de la característica BJT se da como sigue:**

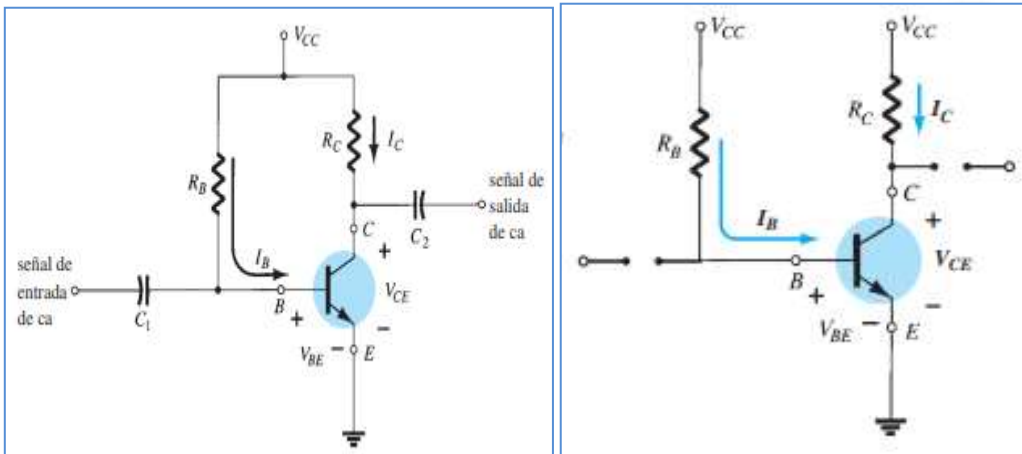
1. Operación en la región lineal: Unión base-emisor polarizada en directa. Unión base-colector polarizada en inversa.
2. Operación en la región de corte: Unión base-emisor polarizada en inversa. Unión base-colector polarizada en inversa.
3. Operación en la región de saturación: Unión base-emisor polarizada en directa. Unión base-colector polarizada en directa.

## Circuitos Amplificadores en las Diferentes Configuraciones

### Configuración de polarización fija

Es la configuración de polarización de cd más simple. Aun cuando la red emplea un transistor npn, las ecuaciones y cálculos aplican igualmente bien para una configuración del transistor pnp tan sólo con cambiar todas las direcciones de la corriente y las polaridades del voltaje. Las direcciones de las corrientes son las direcciones reales y la notación de doble subíndice estándar define los voltajes. Para el análisis de

cd se puede aislar la red de los niveles de ca indicados reemplazando los capacitores con un equivalente de circuito abierto, ya que la reactancia de un capacitor con cd es Además, la fuente de cd VCC se puede dividir en dos fuentes (sólo para propósitos de análisis) para separar los circuitos de entrada y salida. También reduce el vínculo entre las dos con la corriente de base IB. La separación es ciertamente válida, como observamos en la figuras a continuación, de modo que VCC está conectada directamente a RB y RC.



### Polarización en directa de la unión base-emisor

Considere primero la malla del circuito base-emisor. Al escribir la ley de voltajes de Kirchhoff en el sentido de las manecillas del reloj para la malla, obtenemos

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Observe la polaridad de la caída de voltaje a través de RB como la estableció la dirección indicada de IB. Resolviendo la ecuación para la corriente IB obtenemos:

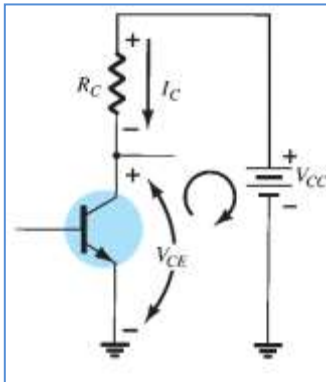
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

No es difícil de recordar si se tiene en cuenta que la corriente de base es la corriente a través de RB, y según la ley de Ohm dicha corriente es el voltaje través de de RB dividido entre la resistencia RB. El voltaje a través de RB es el voltaje aplicado a VCC en un extremo menos la caída a través de la unión base a emisor Además como el voltaje de alimentación VCC y el voltaje de base a emisor VBE son constantes, la selección de un resistor de base RB establece el límite de la corriente de base para el punto de operación.

### Malla colector-emisor

La sección colector-emisor de la red con la dirección indicada de la corriente IC y la polaridad resultante a través de RC. La magnitud de la corriente de colector está relacionada directamente con IB mediante

$$I_C = \beta I_B$$



Es interesante hacer notar que como a la corriente de base la controla el nivel de  $R_B$  e  $I_C$  está relacionada con  $I_B$  por una constante  $\beta$ , la magnitud de  $I_C$  no es una función de la resistencia  $R_C$ . El cambio de  $R_C$  a cualquier nivel no afectará el nivel de  $I_B$  o  $I_C$  mientras permanezcamos en la región activa del dispositivo. Sin embargo, como veremos, el nivel de  $R_C$  determinará la magnitud de  $V_{CE}$ , la cual es un parámetro importante. Al aplicar la ley de voltajes de Kirchhoff en el sentido de las manecillas del reloj alrededor de la malla.

$$V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

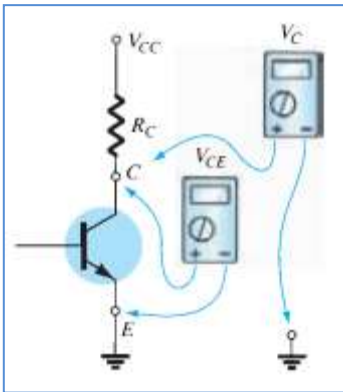
La cual establece que el voltaje a través de la región colector-emisor de un transistor en la configuración de polarización fija es el voltaje de alimentación menos la caída de voltaje a través de  $R_C$ . Como un breve repaso de la notación de subíndice sencillo y doble recordemos que

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Donde  $V_{CE}$  es el voltaje del colector al emisor y  $V_E$  son los voltajes de colector y emisor a tierra. En este caso, como  $V_E = 0$  V, tenemos

$$V_{CE} = V_C$$

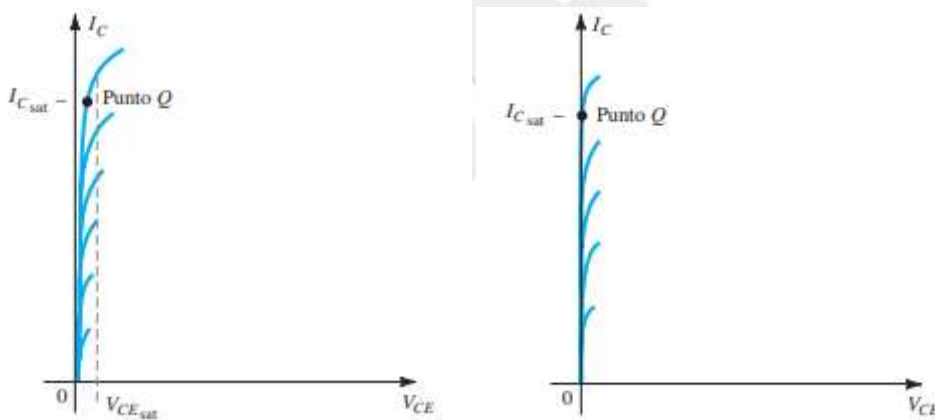
Tenga en cuenta que los niveles de voltaje como  $V_{CE}$  se determinan colocando el cable rojo (positivo) del voltmetro en la terminal del colector con el negro (negativo) en la terminal del emisor, es el voltaje del colector a tierra y se mide como se muestra en la misma figura. En este caso, las dos lecturas son idénticas, pero en las redes que siguen las dos pueden ser muy diferentes. Es muy importante entender bien la diferencia entre las dos lecturas para la solución de fallas de redes de transistores.



### Saturación del transistor

El término saturación se aplica a cualquier sistema donde los niveles han alcanzado su valor máximo. Una esponja saturada es aquella que no puede contener otra gota de líquido. Para un transistor que opera en la región de saturación la corriente es un valor máximo para el diseño particular. Cambie el diseño y el nivel de saturación correspondiente puede elevarse o reducirse. Por supuesto, la corriente de colector máxima define el nivel de saturación máximo tal como aparece en la hoja de especificaciones

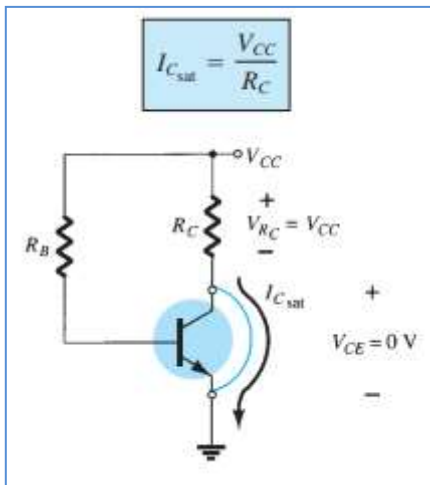
Normalmente se evitan las condiciones de saturación porque la unión base-colector ya no está polarizada en inversa y la señal amplificada de salida se distorsionará. Un punto de operación en la región de saturación. Observe que en esta región es donde se unen las curvas de las características y el voltaje del colector al emisor está en o por debajo de Además, la corriente del colector es relativamente alta en la curva de las características.



Si aproximamos las curvas, aparece un método rápido y directo de determinar el nivel de saturación. La corriente es relativamente alta y se supone que el voltaje VCE es de 0 V. Al aplicar la ley de Ohm podemos determinar la resistencia entre el colector y el emisor como sigue

$$R_{CE} = \frac{V_{CE}}{I_C} = \frac{0 \text{ V}}{I_{C_{sat}}} = 0 \Omega$$

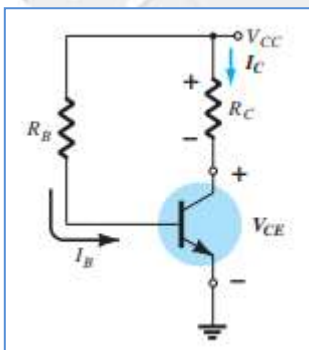
Aplicando los resultados al esquema de la red. Por consiguiente, si en el futuro hubiera la necesidad inmediata de conocer la corriente máxima aproximada del colector (nivel de saturación) para un diseño particular, basta insertar un equivalente de cortocircuito entre el colector y el emisor del transistor y calcular la corriente del colector resultante. En suma, establezca  $V_{CE} = 0 \text{ V}$ . Para la configuración de polarización se aplicó un cortocircuito, lo que provocó que el voltaje a través de  $R_C$  fuera el voltaje aplicado  $V_{CC}$ . La corriente de saturación resultante para la configuración de polarización fija es

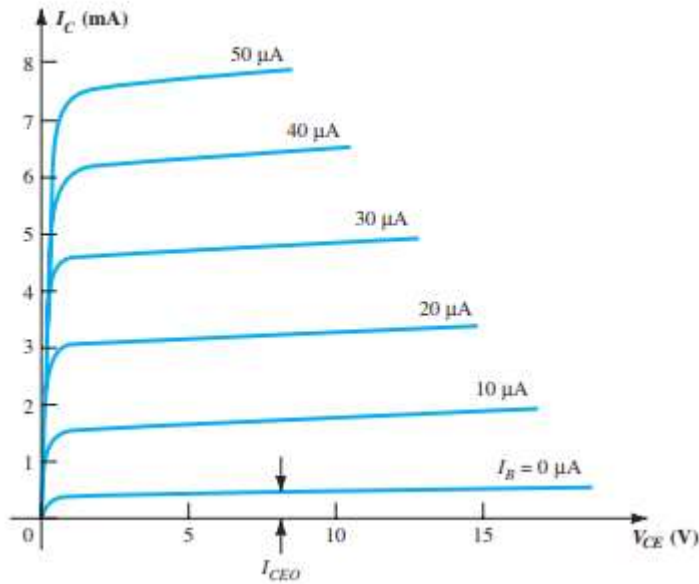


Una vez que se conoce tenemos una idea de la posible corriente máxima del colector para el diseño seleccionado y del nivel que debe permanecer bajo si esperamos que la amplificación sea lineal

### Análisis por medio de la recta de carga

Recuerde que la solución de recta de carga de una red de diodo se encontró superponiendo las características reales del diodo sobre una gráfica de la ecuación de la red que implica las mismas variables de la red. La intersección de las dos gráficas definió las condiciones de operación reales para la red. Se conoce como análisis por medio de la recta de carga porque la carga (resistores de la red) de la red definía la pendiente de la línea recta que conecta los puntos definidos por los parámetros de la red



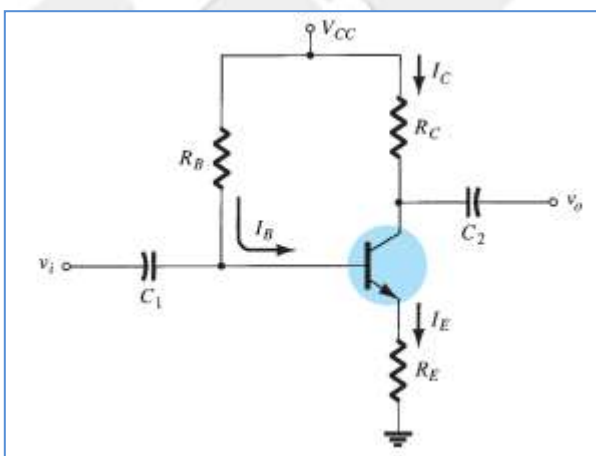


Más pronunciada será la pendiente de la recta de carga de la red. La red establece una ecuación de salida que relaciona las variables  $I_C$  y  $V_{CE}$  de la siguiente manera:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

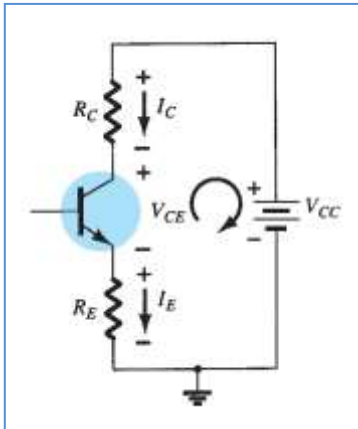
### Configuración de polarización de emisor

La red de polarización de cd contiene un resistor emisor para mejorar la estabilidad del nivel en relación con la de la configuración de polarización fija. Demostraremos la estabilidad mejorada por medio de un ejemplo numérico más adelante en esta sección. El análisis lo realizaremos examinando primero la malla base-emisor y luego utilizando los resultados para investigar la malla colector-emisor. El equivalente de cd con la fuente separada para crear una sección de entrada y salida.



### Malla colector-emisor

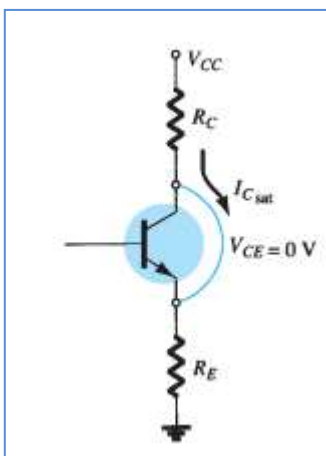
La malla colector-emisor se dibujó de nuevo. Al escribir la ley de voltajes de Kirchhoff para la malla indicada en el sentido de las manecillas del reloj.



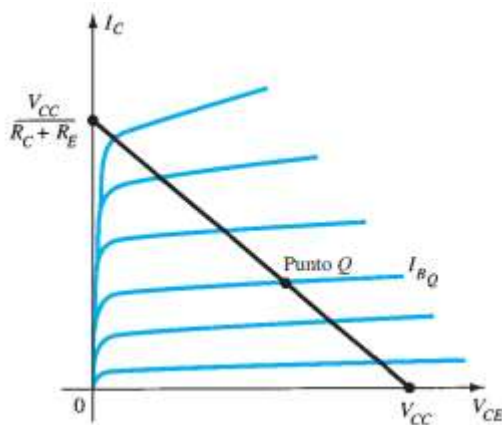
### Nivel de saturación

El nivel de saturación del colector o su corriente máxima en un diseño de polarización de emisor se determina con el mismo procedimiento aplicado a la configuración de polarización fija. Aplique un cortocircuito entre el colector y el emisor

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$



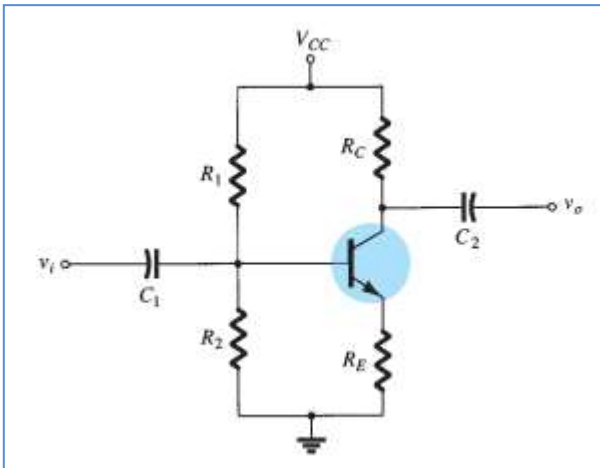
La adición del resistor del emisor reduce el nivel de saturación en el colector por debajo del obtenido, con una configuración de polarización fija con el mismo resistor del colector.



### Polarización por configuración medio del divisor de voltaje

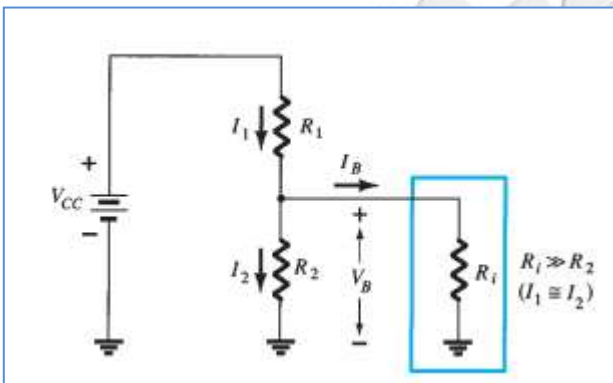
En la configuración de polarización anterior, la corriente de polarización y el voltaje eran funciones de la ganancia de corriente  $\beta$  del transistor. Sin embargo, como  $\beta$  es sensible a la temperatura, sobre todo si se trata de transistores de silicio, y como el valor real de beta en general no está muy bien definido, conviene desarrollar un circuito de polarización que dependa menos de, o que en realidad sea independiente, de la beta del transistor. La configuración de polarización por medio del divisor de voltaje es esa red. Si se analiza de una forma exacta, la sensibilidad a los cambios en beta es muy pequeña. Si los parámetros del circuito se seleccionan apropiadamente, los niveles resultantes de  $I_C$  y  $V_{CE}$  son casi totalmente independientes de beta. Recuerde por los análisis anteriores que el nivel fijo de  $I_C$  y  $V_{CE}$  define un punto Q. El nivel de  $I_C$  cambiará con el cambio en beta, pero el punto de operación en las características definido por  $I_C$  y  $V_{CE}$  puede permanecer fijo si se emplean los parámetros de circuito correctos.

Como observamos antes, existen dos métodos que se pueden aplicar para analizar la configuración del divisor de voltaje. La razón de los nombres seleccionados para esta configuración será obvia en el análisis siguiente. El primero que se demostrará es el método exacto, el cual se puede aplicar a cualquier configuración del divisor de voltaje. El segundo, conocido como método aproximado, se puede aplicar sólo si se satisfacen condiciones específicas. El método aproximado permite un análisis más directo con ahorro de tiempo y energía. También es particularmente útil en el modo de diseño que se describirá en una sección más adelante. En definitiva, el aproximado se puede aplicar a la mayoría de las situaciones y, por consiguiente, deberá examinarse con el mismo interés que el exacto



### Análisis aproximado

La sección de entrada de la configuración del divisor de voltaje la puede representar la red. La resistencia  $R_i$  es la resistencia equivalente entre la base y tierra del transistor con un resistor del emisor  $R_E$ . La resistencia reflejada entre la base y el emisor está definida por  $S_i$ . Si  $R_i$  es mucho más grande que la resistencia  $R_2$ , la corriente  $I_B$  será mucho menor que  $I_2$  (la corriente siempre busca la ruta de menor resistencia) e  $I_2$  será aproximadamente igual a  $I_1$ . Si aceptamos la aproximación de que  $I_B$  es en esencia de 0 A comparada con  $I_1$  o  $I_2$ , entonces  $I_1$ ,  $I_2$  y  $R_1$  y  $R_2$  se pueden considerar como elementos en



### Saturación del transistor

El circuito colector-emisor de salida en el caso de la configuración del divisor de voltaje tiene la misma apariencia que el circuito polarizado de emisor analizado. La ecuación resultante para la corriente de saturación (cuando se ajusta a 0 V en el esquema) es, por consiguiente, la misma que se obtuvo para la configuración polarizada de emisor. Es decir,

$$I_{C_{sat}} = I_{C_{m\acute{a}x}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

## Análisis por medio de la recta de carga

Las semejanzas con el circuito de salida de la configuración polarizada de emisor producen las mismas intersecciones para la recta de carga de la configuración del divisor de voltaje. Por tanto, la recta de carga tendrá la misma apariencia.

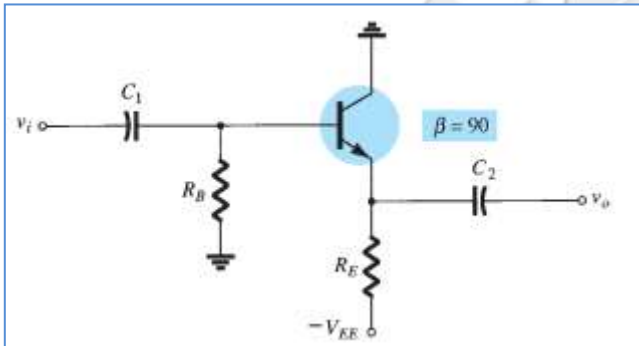
$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \Big|_{V_{CE}=0V}$$

$$V_{CE} = V_{CC} \Big|_{I_C=0mA}$$

Una ecuación diferente determina el nivel de  $I_B$  para las configuraciones del divisor de voltaje y de polarización de emisor.

## Configuración en emisor-seguidor

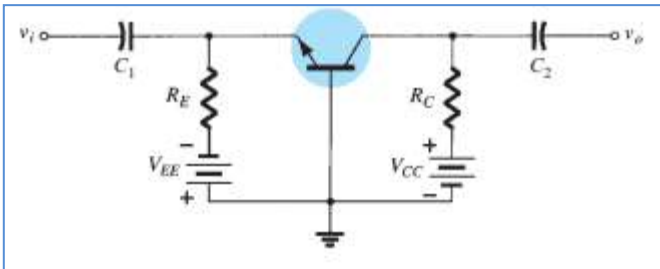
Las secciones anteriores presentaron configuraciones en las cuales el voltaje de salida en general se toma del colector terminal del BJT. En esta sección analizaremos una configuración donde la salida se toma de la terminal del. La configuración no es sólo la única donde la salida se puede tomar de la terminal del emisor. De hecho, cualquiera de las configuraciones que se acaban de describir se puede utilizar mientras haya un resistor en la rama del emisor



## Configuración en base común

La configuración en base común se diferencia en que la señal aplicada está conectada al emisor y la base está en, o un poco arriba, del potencial de tierra. Es una configuración bastante popular porque en el dominio de ca tiene una muy baja impedancia de entrada, una alta impedancia de salida y una buena ganancia.

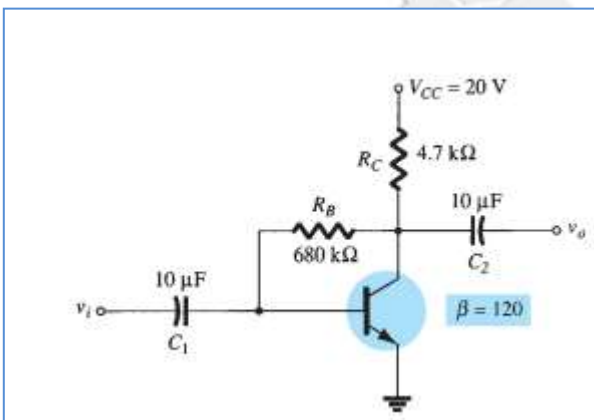
Una configuración en base común típica. Observe que en esta configuración se utilizan dos fuentes y la base es la terminal común entre la terminal del emisor de entrada y la terminal del colector de salida.



## Diversas configuraciones de polarización

Existen varias configuraciones de polarización de los BJT que no concuerdan con el molde básico de las que se analizaron en las secciones anteriores. En realidad, hay variaciones de diseño que ocuparían más páginas de las posibles en un libro de este tipo. Sin embargo, el propósito principal en este caso es recalcar aquellas características del dispositivo que permiten el análisis de cd de la configuración y el establecimiento de un procedimiento general que nos conduzca a la solución deseada. Para cada configuración analizada hasta ahora, el primer paso ha sido la derivación de una expresión para la corriente de base. Una vez conocida ésta, se pueden determinar de forma bastante directa la corriente del colector y los niveles de voltaje del circuito de salida. Esto no quiere decir que todas las soluciones seguirán esta ruta, pero sugiere una vía posible si se presenta una configuración nueva.

El primer ejemplo es en el que el resistor del emisor se eliminó de la configuración de realimentación. El análisis es muy parecido, pero no requiere eliminar  $R_E$  de la ecuación aplicada



## Operaciones de diseño

Lo presentado hasta ahora se ha enfocado en los análisis de las redes existentes. Todos los elementos están en su lugar y todo es una mera forma de determinar los niveles de corriente y voltaje de la configuración. El proceso de diseño es aquel en el que se pueden especificar la corriente o el voltaje, o ambos, y se deben determinar los elementos requeridos para establecer los niveles designados. Este proceso de síntesis requiere una comprensión clara de las características del dispositivo, las ecuaciones

básicas para la red y las leyes básicas de análisis de circuitos, como la ley de Ohm, la ley de voltajes de Kirchhoff, etc. En la mayoría de las situaciones, el proceso de razonamiento se enfrenta a un reto mayor en el proceso de diseño que en la secuencia de análisis. La ruta hacia una solución no está tan bien definida y de hecho muchas requieren varias suposiciones básicas que no tienen que llevarse a cabo cuando sólo se analiza una red.

Obviamente, la secuencia de diseño es insensible a los componentes que ya están especificados y a los elementos que se van a determinar. Si se especifican el transistor y las fuentes, el proceso de diseño se concretará a determinar los resistores requeridos para un diseño particular. Una vez determinados estos valores teóricos de los resistores, por lo común se seleccionan los valores comerciales estándar más cercanos y cualesquier variaciones provocadas por no utilizar los valores de resistencia exactos se aceptan como parte del diseño. Ésta es ciertamente una aproximación válida considerando las tolerancias normalmente asociadas a los elementos resistivos y los parámetros del transistor.

Si se van a determinar valores resistivos, una de las ecuaciones más poderosas es la ley de Ohm en la forma siguiente:

$$R_{\text{desconocida}} = \frac{V_R}{I_R}$$

En un diseño particular, el voltaje a través de un resistor a menudo se determina a partir de los niveles especificados. Si hay especificaciones adicionales que definen el nivel de la corriente, para calcular el nivel de resistencia requerido. Los primeros ejemplos demostrarán cómo determinar algunos elementos particulares a partir de los niveles especificados. Luego se presentará un procedimiento completo de diseño para dos configuraciones de uso común.

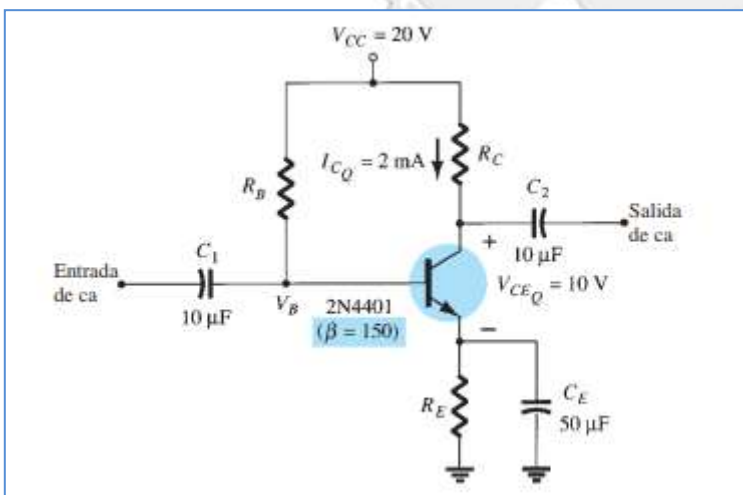
A continuación se presentará una técnica para diseñar un circuito completo que opere en un punto de polarización especificado. A menudo, las hojas de especificaciones del fabricante proporcionan información sobre un punto de operación sugerido (o región de operación) de un transistor particular. Además, otros componentes del sistema conectados al amplificador dado también pueden definir la excursión de la corriente, la excursión del voltaje, el valor del voltaje de alimentación común, etc., para el diseño. En la práctica, se deben considerar muchos otros factores que pudieran afectar la selección del punto de operación deseado.

Por el momento nos concentramos en determinar los valores de los componentes para obtener un punto de operación especificado. La presentación se limitará a las configuraciones de polarización de emisor y del divisor de voltaje, aun cuando el mismo procedimiento se puede aplicar a muchos otros circuitos de transistores

## Diseño de un circuito de polarización con un resistor de realimentación de emisor

Consideremos primero el diseño de los componentes de polarización de cd de un circuito amplificador que cuenta con estabilización de polarización por medio de un resistor de emisor. El voltaje de alimentación y el punto de operación se seleccionaron de la información del fabricante sobre el transistor utilizado en el amplificador

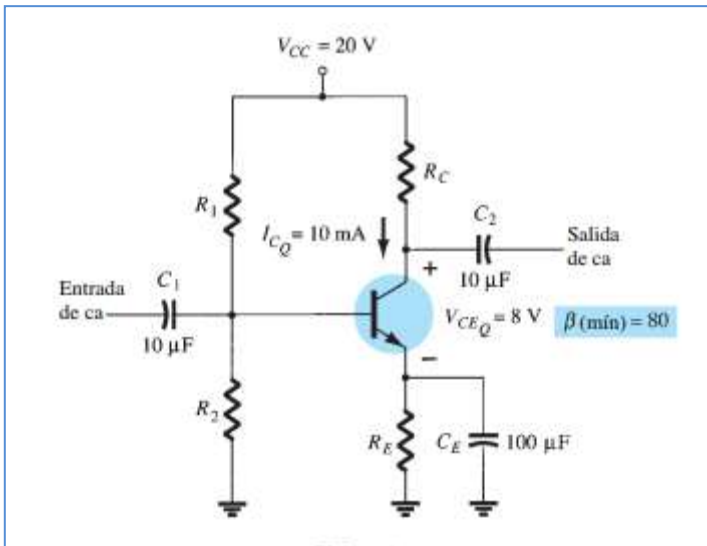
La selección de los resistores del colector y del emisor no se derivó directamente de la información que se acaba de especificar. La ecuación que relaciona los voltajes alrededor de la malla colector-emisor incluye dos cantidades desconocidas: los resistores  $R_C$  y  $R_E$ . En este punto debe hacerse algún juicio de ingeniería, como el nivel del voltaje en el emisor comparado con el voltaje de alimentación aplicado. Recuerde que la necesidad de incluir un resistor del emisor a tierra fue estabilizar la polarización de cd de modo que el cambio de la corriente del colector provocado por corrientes de fuga en el transistor y por la beta de éste, no provoquen un gran desplazamiento del punto de operación. El resistor del emisor no puede ser demasiado grande porque el voltaje a través de él limita el intervalo de variación del voltaje del colector al emisor (lo que se verá cuando se analice la respuesta de ca). Los ejemplos examinados en este capítulo revelan que el voltaje de emisor a tierra por lo general es de alrededor de un cuarto a un décimo de voltaje de alimentación. Seleccionando el caso conservador de un décimo se puede calcular el resistor del emisor  $R_E$  y el resistor  $R_C$  del mismo que en los ejemplos que se acaban de considerar. En el siguiente ejemplo realizamos un diseño completo de la red, utilizando los criterios recién presentados sobre el voltaje para el emisor



## Diseño de un circuito estabilizado por ganancia de corriente (independiente de beta)

El circuito proporciona estabilización ante cambios tanto de fuga como de ganancia de corriente (beta). Se deben obtener los cuatro valores de los resistores mostrados para el punto de operación especificado. El juicio de ingeniería para seleccionar un valor del voltaje en el emisor  $V_E$  como en la consideración

anterior de diseño, conduce a la solución directa de todos los valores de los resistores. Todos los pasos de diseño se demuestran en el siguiente ejemplo.

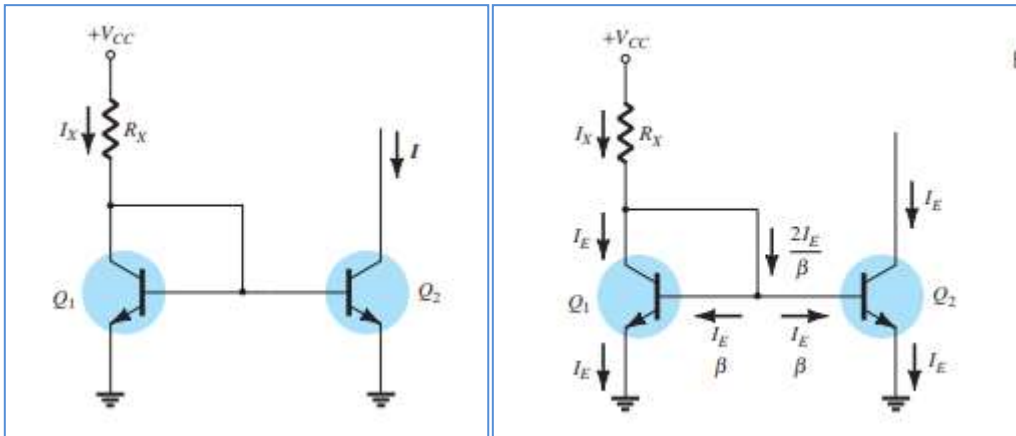


### Circuitos de espejo de corriente

Un circuito de espejo de corriente produce una corriente constante y se utiliza principalmente en circuitos integrados. La corriente constante se obtiene desde una corriente de salida, la cual es la reflexión o espejo de una corriente constante desarrollada en un lado del circuito. El circuito es particularmente adecuado para la fabricación de circuitos integrados porque el circuito requiere que los transistores tengan caídas de voltaje idénticas entre la base y el emisor, y valores idénticos de beta, lo cual se logra mejor cuando los transistores se forman al mismo tiempo en la fabricación de circuitos integrados. La corriente  $I_X$  establecida por el transistor Q1 y el resistor  $R_X$  se reflejan en la corriente  $I$  mediante el transistor Q2.

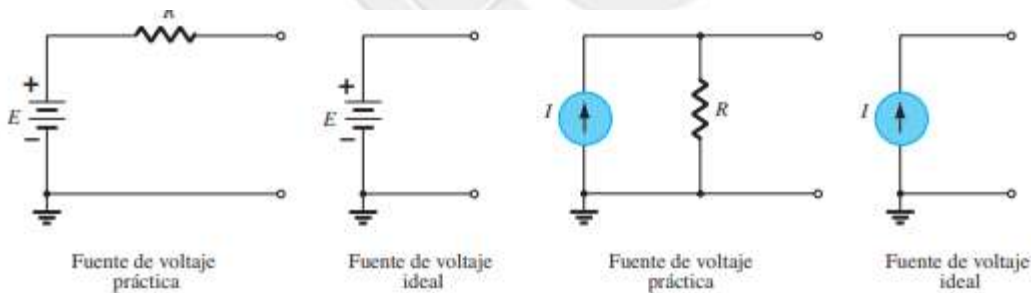
Las corrientes  $I_X$  e  $I$  se obtienen utilizando las corrientes que se listan. Suponemos que la corriente de emisor ( $I_E$ ) en ambos transistores es la misma (Q1 y Q2 se fabrican muy cerca uno de otro en el mismo chip). Las dos corrientes de base en el transistor son aproximadamente

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \approx \frac{I_E}{\beta}$$



### Circuitos de fuente de corriente

El concepto de una fuente de energía constituye el punto de partida de nuestra consideración de circuitos de fuente de corriente. Una fuente de voltaje práctica es una fuente de voltaje en serie con una resistencia. Una fuente de voltaje ideal tiene  $R = 0$ , en tanto que una fuente práctica incluye alguna resistencia. Una fuente de corriente práctica es una fuente de corriente en paralelo con una resistencia. Una fuente de corriente ideal tiene en tanto que una fuente de corriente práctica incluye alguna resistencia muy grande. Una fuente de corriente ideal produce una corriente constante sin tomar en cuenta la carga que esté conectada a ella. Se pueden construir circuitos de corriente constante con dispositivos bipolares, dispositivos FET y una combinación de estos componentes. Hay circuitos utilizados por separado y otros más adecuados para su operación en circuitos integrados.



### Técnicas de solución de fallas

El arte de solucionar fallas es un tema tan amplio que no se puede analizar todo un conjunto de posibilidades y técnicas en sólo algunas secciones de un libro. Sin embargo, el profesionalista deberá conocer algunas maniobras y mediciones básicas para aislar el área del problema y posiblemente identificar una solución. Es obvio que el primer paso para poder solucionar una falla en una red es entender plenamente el comportamiento de la red y tener una idea de los niveles de corriente y voltaje esperados. Para el transistor en la región activa, el nivel de  $i_c$  más importante mensurable es el voltaje de base a emisor.

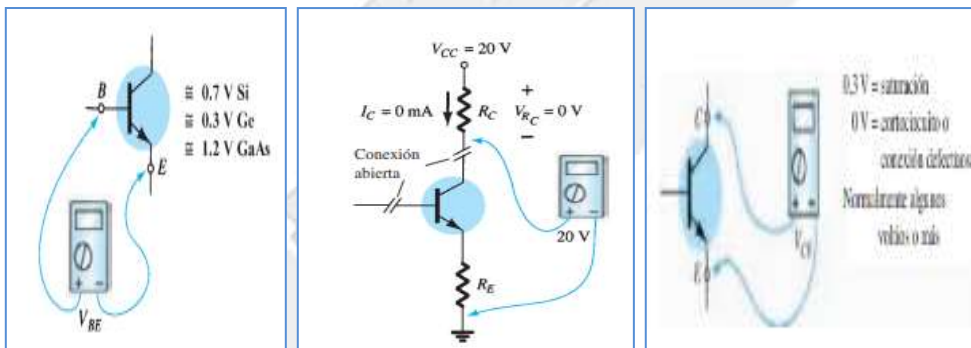
**Para un transistor “encendido”, el voltaje  $V_{BE}$  deberá ser de cerca de 0.7 V**

Las conexiones correctas para medir el voltaje  $V_{BE}$ . Observe que el cable (rojo) positivo está conectado a la base para un transistor npn y el cable (negro) negativo al emisor. Cualquier lectura totalmente diferente del nivel esperado de alrededor de 0.7 V, como 0.4, o 12 V, o un valor negativo, haría sospechar que se deberían verificar las conexiones del dispositivo o red. Para un transistor pnp se pueden utilizar las mismas conexiones, pero se debe esperar una lectura negativa.

Un nivel de voltaje igual de importante es el voltaje de colector a emisor. Recuerde que por las características generales de un BJT los niveles de  $V_{CE}$  de cerca de 0.3 V indican un dispositivo saturado; una condición que no debiera presentarse, a menos que se esté empleando como interruptor. Sin embargo:

**Para el amplificador transistorizado común en la región activa, en general  $V_{CE}$  es aproximadamente de 25% a 75% de  $V_{CC}$ .**

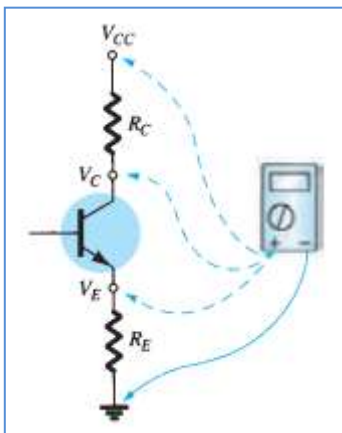
Para  $V_{CC}$  20 V, una lectura de  $V_{CE}$  de 1 V a 2 V o de 18 V a 20 V es un resultado poco común, y a menos que el dispositivo haya sido diseñado a propósito para esta respuesta, se deberían investigar el diseño y operación. Si  $V_{CE}$  20 V (con  $V_{CC}$  20 V) por lo menos existen dos posibilidades: o el dispositivo (BJT) está dañado y tiene las características de un circuito abierto entre el colector y el emisor, o una conexión en el circuito colector-emisor, o base-emisor, lo que hace que  $I_C = 0$ , el cable negro del voltmetro está conectado a la tierra común de la fuente y el cable rojo a la terminal inferior del resistor. Sin corriente de colector y una caída resultante a través de  $R_C$  dará por resultado una lectura de 20 V.



Una corriente de base de 28.4 mA sin duda situaría el diseño en una región de saturación y quizá se dañaría el dispositivo. Como los valores reales del resistor a menudo son diferentes del valor del código nominal (recuerde los niveles de tolerancia para los elementos resistivos), es tiempo bien empleado el de medir un resistor antes de insertarlo en la red. El resultado son valores reales más cercanos a los niveles teóricos y la seguridad de que se está empleando la resistencia correcta.

Hay momentos de frustración. Usted verifica el dispositivo con un trazador de curvas, u otros instrumentos de prueba de los BJT, y parece que está en buenas condiciones. Todos los niveles de resistencia parecen correctos, las conexiones lucen sólidas y se ha aplicado el voltaje de alimentación correcto; ¿y ahora qué sigue? Ahora es cuando el solucionador de fallas debe esforzarse por lograr un alto grado de sofisticación. ¿Podría ser que la conexión interna entre el cable y su conector final estuviera

defectuosa? ¿Cuántas veces basta tocar el cable en el punto apropiado para crear una situación de “ruptura” entre las conexiones? Tal vez se encendió la fuente y se ajustó al voltaje correcto pero la perilla de control de corriente se dejó en la posición cero, lo que impidió que se desarrollara el nivel de corriente correcto, demandado por el diseño de la red. Obviamente, cuanto más complejo es el sistema, más amplio es el intervalo de posibilidades. En todo caso, uno de los métodos más efectivos de verificar la operación de una red es comprobar varios niveles de voltaje con respecto a tierra, conectando el cable negro (negativo) de un voltmetro a tierra y “tocando” las terminales importantes con el cable rojo (positivo). Si el cable rojo está conectado directamente a VCC, deberá leer VCC volts porque la red tiene una tierra común para la fuente y los parámetros de la red. En VC la lectura deberá ser menor, determinada por la caída a través de  $R_C$  y  $V_E$  deberá ser menor que VC en una cantidad igual al voltaje del colector al emisor VCE. Si cualquiera de estos puntos no registra lo que pareciera ser un nivel razonable puede ser un indicio de que alguna conexión o un elemento están defectuosos. Si y son valores razonables pero VCE es 0 V, entonces hay posibilidades de que el BJT esté dañado y que se dé una equivalencia de cortocircuito entre las terminales del colector y el emisor. Como se observó antes, si VCE registra un nivel de aproximadamente 0.3 V como lo define VCE VC VE (la diferencia de los dos niveles se midió previamente), la red puede estar saturada con un dispositivo que puede o no estar defectuoso.

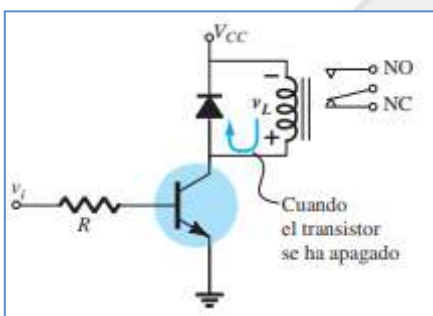
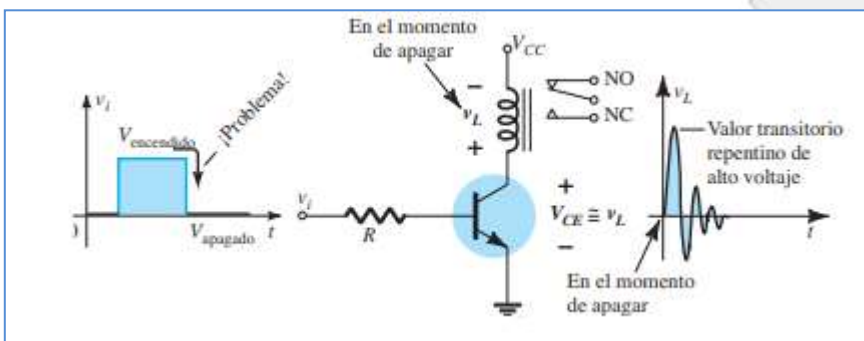


### Aplicaciones prácticas

Al igual que con los diodos, sería prácticamente imposible proporcionar incluso un tratamiento superficial de las numerosas áreas de aplicación de los BJT. Sin embargo, aquí se seleccionaron algunas aplicaciones para demostrar cómo se utilizan las diferentes facetas de las características de los BJT para realizar varias funciones.

**Controlador de relevador** Esta aplicación en cierto modo es una continuación del análisis de diodos sobre cómo se pueden reducir al mínimo los efectos de la reacción inductiva mediante un diseño apropiado. Se utiliza un transistor para establecer la corriente necesaria para energizar el relevador en el circuito colector. Sin ninguna entrada en la base del transistor, la corriente de base, la corriente del colector, y la corriente en la bobina, son en esencia de 0 A y el relevador se mantiene en estado desenergizado (NO,

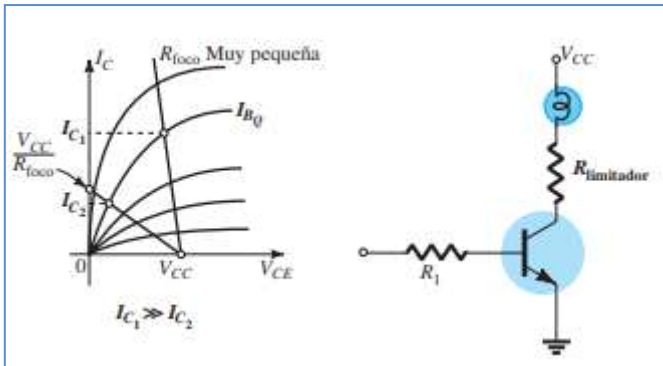
normalmente abierto). Sin embargo, cuando se aplica un pulso positivo a la base, el transistor se enciende y se establece a través de la bobina del electroimán una corriente suficiente para cerrar el relevador. Ahora pueden surgir problemas cuando la señal se elimina de la base para apagar el transistor y desenergizar el relevador. Idealmente, la corriente a través de la bobina y del transistor se reducirá a cero de inmediato, el brazo del relevador se liberará y el relevador simplemente permanecerá dormido hasta la siguiente señal de “encendido”. Sin embargo, sabemos por nuestros cursos básicos de circuitos que la corriente a través de una bobina no cambia de forma instantánea y, de hecho, cuanto más rápido cambia, mayor es el voltaje inducido a través de la bobina, de acuerdo con la ecuación En este caso, la corriente rápidamente cambiante a través de la bobina desarrollará un gran voltaje a través de la bobina con la polaridad, la cual aparecerá directamente a través de la salida del transistor. Hay probabilidades de que su magnitud exceda los valores máximos del transistor y de que el dispositivo semiconductor se dañe permanentemente. El voltaje a través de la bobina no permanecerá en su nivel de conmutación más alto sino que oscilará como se muestra, hasta que su nivel se reduzca a cero a medida que el sistema se asiente.



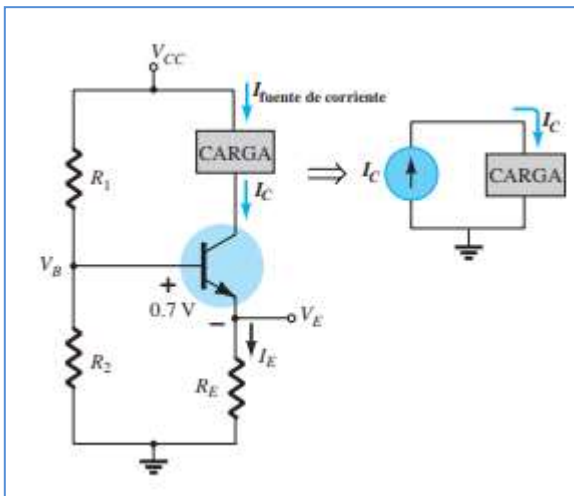
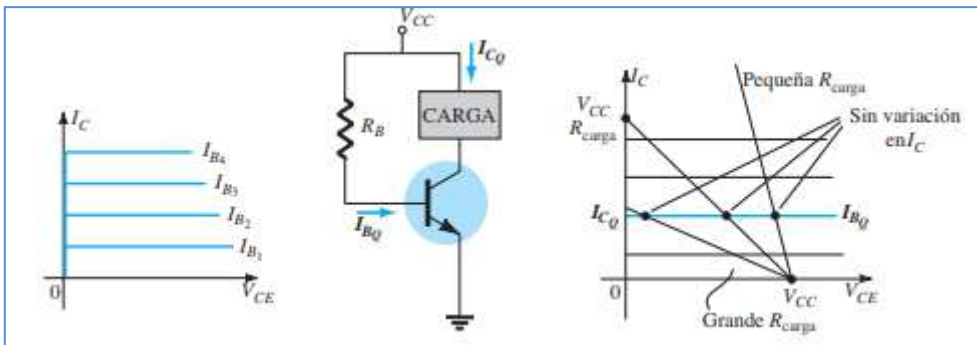
## Interruptor de transistor

Se utiliza un transistor como interruptor para controlar los estados “encendido” y “apagado” de un foco situado en una extensión del colector de la red. Cuando el interruptor está en la posición “encendido”, tenemos una situación de polarización fija en la que el voltaje de la base al emisor está a su nivel de 0.7 V y el resistor R1 controla la corriente de base y la impedancia de entrada del transistor. La corriente a través del foco será entonces beta veces la corriente de base y el foco se encenderá. Sin embargo, puede surgir un problema si el foco no ha estado encendido durante algún tiempo. Cuando un foco se enciende por primera vez, su resistencia es bastante baja, aun cuando ésta se incrementará con rapidez cuanto más

dure encendido el foco. Esto puede ocasionar un alto nivel momentáneo de corriente del colector, la cual, con el tiempo, podría dañar el foco y el transistor., por ejemplo, se incluye la recta de carga de la misma red con la resistencia fría y caliente del foco. Observe que aun cuando el circuito de base establece la corriente de base, la intersección con la recta de carga produce una corriente más elevada para el foco frío. Cualquier cuestión en relación con el nivel de encendido es fácil de corregir insertando un pequeño resistor adicional en serie con el foco, como se muestra en la figura 4.93c, precisamente para garantizar un límite en el cambio repentino de la corriente cuando el bulbo se encienda por primera vez.



**Fuente de corriente constante (CCS)** Si suponemos que las características de un transistor (beta siempre constante), se puede crear una excelente fuente de corriente por medio de la configuración de transistor simple, porque independientemente de cuál sea la resistencia de la carga, la corriente del colector o de la carga no cambiará. La corriente de base es fija; no importa donde esté la recta de carga, la corriente del colector no cambia. En otras palabras, la corriente del colector es independiente de la carga en el circuito del colector: una fuente de corriente perfecta. Sin embargo, como las características reales, donde beta variará de un punto a otro, y aun cuando la corriente de base puede ser fija por la configuración, la beta variará de un punto a otro con la intersección de la carga, e IC IL también lo hará; ésta no es una característica de una fuente de corriente. Recuerde, sin embargo, que la configuración del divisor de voltaje produjo un bajo nivel de sensibilidad a beta, así que si se utiliza esa configuración de polarización, tal vez la fuente de corriente equivalente se aproxime más a la realidad. De hecho, ése es el caso. Si se emplea una configuración de polarización, la sensibilidad a los cambios del punto de operación provocados por cargas variables es mucho menor y la corriente de colector permanecerá casi constante ante los cambios de resistencia de la carga en la rama del colector. De hecho, el voltaje en el emisor lo determina



Base a emisor se reducirá. La reducción de  $V_{BE}$  hará que  $I_B$  y por consiguiente se reduzcan. El resultado es una situación en la que cualquier tendencia de  $I_C$  de incrementarse se enfrentará a una reacción de la red que se opondrá al cambio de estabilizar el sistema.

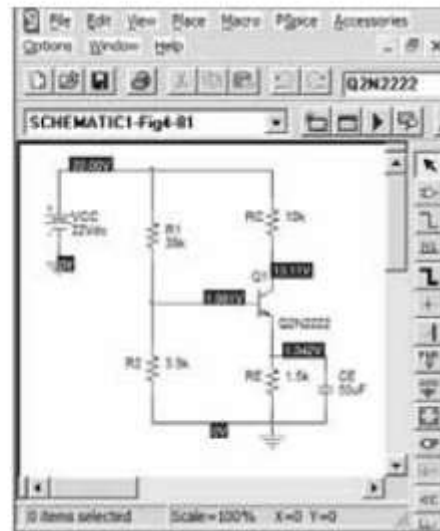
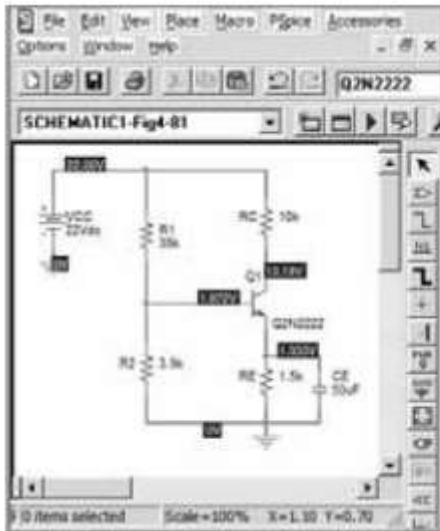
## Simulación

### Análisis por computadora PSpice para Windows

Configuración del divisor de voltaje Ahora puede comprobar los resultados con PSpice para Windows. Utilizando los métodos descritos, podemos construir la red.

El valor de beta se cambia a 140 haciendo clic primero en el símbolo de transistor en la pantalla. Luego aparecerá en rojo para indicar que está activo. Prosiga con Edit.-PSpice-Model y se desplegará el cuadro de diálogo PSpice-Model Editor Lite donde puede cambiar  $\beta_f$  a 100. Cuando trate de salir del cuadro de diálogo se despliega el cuadro de diálogo Model-Editor/9.2 y le preguntará si desea guardar los cambios, en la biblioteca de redes. Una vez que los haya guardado, la pantalla regresará automáticamente con la beta ajustada a su nuevo valor.

Entonces puede proseguir con el análisis, seleccionando la tecla Create a new simulation profile (parece una hoja impresa con un asterisco en la esquina superior izquierda) para obtener el cuadro de diálogo New Simulation. Inserte y seleccione Create. Aparecerá el cuadro de diálogo Simulation Settings y seleccione Bias Point bajo el encabezado Analysis Type. Haga clic en OK y el sistema está listo para la simulación.

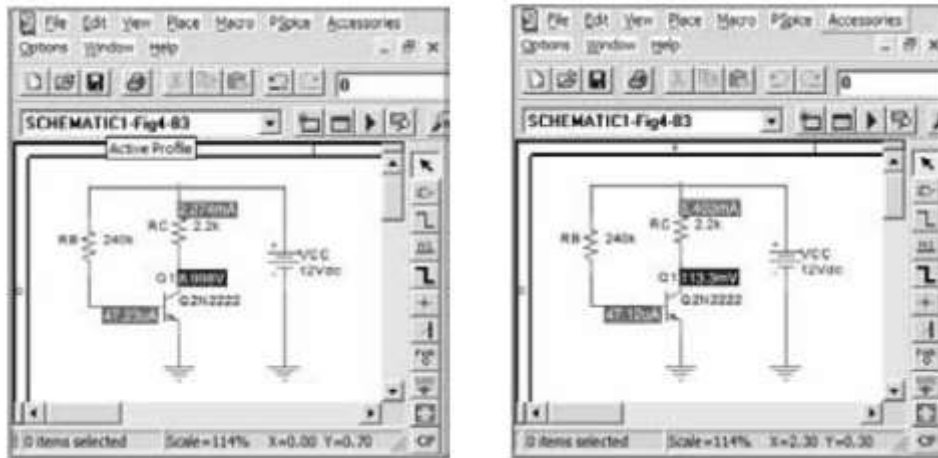


Para continuar, seleccione la tecla Run PSpice (flecha azul) o la secuencia PSpice-Run. Los voltajes de polarización aparecerán si seleccionó la opción V. El voltaje de colector a emisor es de 13.19 V 1.333 V 11.857 V contra 12.22 V. La diferencia se debe principalmente al hecho de que utilizamos un transistor real ANÁLISIS POR 231 COMPUTADORA cuyos parámetros son muy sensibles a las condiciones de operación. También recuerde la diferencia del valor de beta especificado y el valor obtenido con la gráfica del capítulo anterior. Como la sensibilidad de la red del divisor de voltaje a los cambios de beta es muy baja, volvamos a las especificaciones del transistor y reemplacemos la beta con el valor preestablecido de 255.9 y vea cómo cambian los resultados. Observe la clara ventaja de tener la red configurada en la memoria. Ahora puede cambiar cualquier parámetro y obtener una nueva solución casi instantáneamente; una maravillosa ventaja en el proceso de diseño

### Configuración de polarización fija

Aun cuando la red de polarización del divisor de voltaje es relativamente insensible a las variaciones de beta, la configuración de polarización fija es muy sensible a las variaciones de beta. Esto se puede demostrar estableciendo la configuración de polarización con una beta de 50 para la primera ejecución de la simulación. El diseño es bastante bueno. El voltaje del colector, o del colector al emisor, es el correcto para la fuente aplicada. Las corrientes resultantes de base y del colector son muy comunes para un buen diseño.

Sin embargo, si ahora volvemos a las especificaciones del transistor y cambiamos beta al valor preestablecido de 255.9, obtenemos los resultados. El voltaje del colector ahora es de sólo 0.113 V con una corriente de 5.4 mA —un terrible punto de operación. Cualquier señal de ca aplicada sería severamente truncada debido al bajo voltaje en el colector.

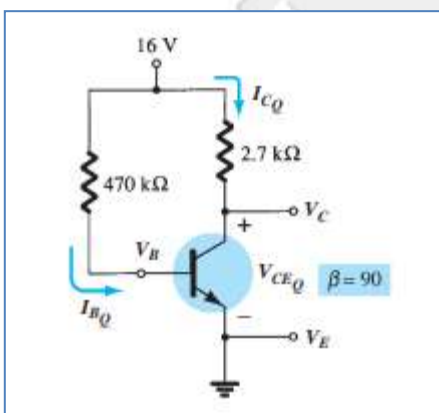


De modo que, con base en el análisis precedente, es obvio que la configuración del divisor de voltaje es el diseño preferido si hubiera alguna preocupación respecto de las variaciones de beta

## Evaluación I

### Configuración de polarización fija

1. Para la configuración de polarización fija de la figura siguiente, determine:  $V_E$ .  $V_B$ .  $V_C$ .  $V_{CEQ}$ .  $I_{CQ}$ .  $I_{BQ}$ .



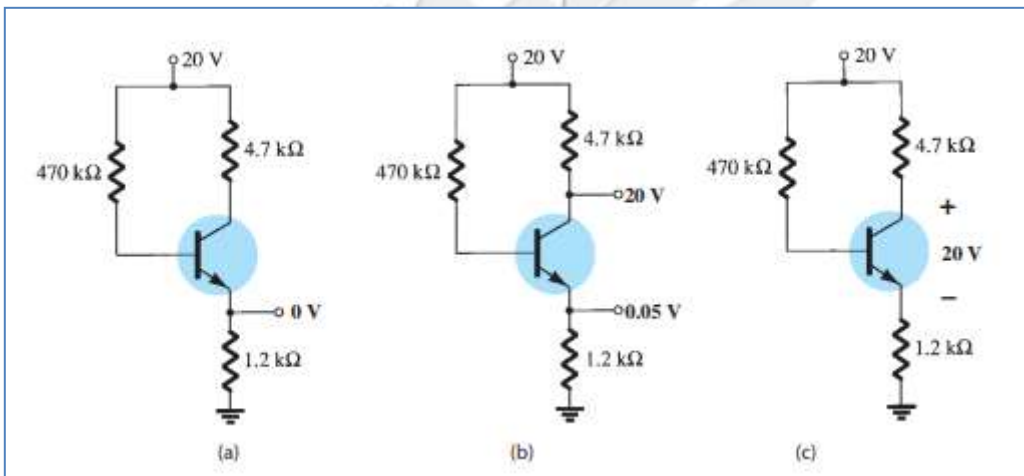
Dadas las características del transistor BJT de la figura anterior:

- a. Trace una recta de carga en las características determinadas por E 21 V y para una configuración de polarización fija.

- b. Seleccione un punto de operación a la mitad entre el corte y la saturación. Determine el valor de  $R_B$  para establecer el punto de operación resultante.
- c. ¿Cuáles son los valores resultantes de  $\beta$  y  $\beta_{DC}$ ?
- d. ¿Cuál es el valor de  $V_{CE}$  en el punto de operación?
- e. ¿Cuál es el valor de  $V_{BE}$  definido por el punto de operación?
- f. ¿Cuál es la corriente de saturación para el diseño?
- g. Trace la configuración de polarización fija resultante.
- h. ¿Cuál es la potencia de  $Q_{DC}$  disipada por el dispositivo en el punto de operación?
- i. ¿Cuál es la potencia suministrada por  $V_{CC}$ ?
- j. Determine la potencia disipada por los elementos resistivos tomando la diferencia entre los resultados de las partes (h) e (i).  $V_{CC}$

**Técnicas de solución de fallas**

Analice los siguientes circuitos



\*47. Todas las lecturas de la figura revelan que la red no está funcionando como es debido. Liste tantas razones como pueda para las lecturas obtenidas.

\*48. Las lecturas que aparecen en la figura revelan que las redes no están funcionando correctamente. Sea específico al describir por qué los niveles obtenidos reflejan un problema con el comportamiento

esperado de la red. En otros términos, los niveles obtenidos reflejan un problema muy específico en cada caso

## Transistor de Efecto de Campo de Unión

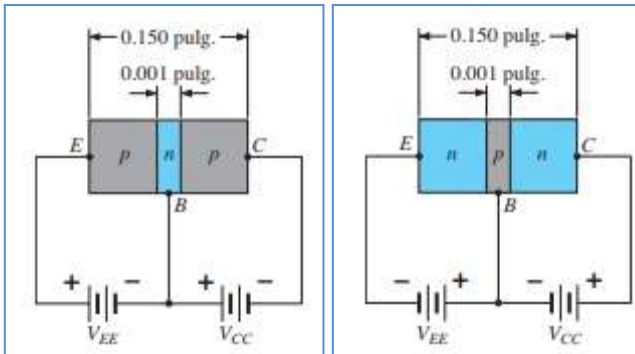
Durante el periodo de 1904 a 1947, el tubo de vacío, o bulbo, fue sin duda el dispositivo electrónico de mayor interés y desarrollo. J. A. Fleming presentó en 1904 el diodo de tubo de vacío. Poco tiempo después, en 1906, Lee de Forest agregó un tercer elemento, llamado rejilla de control al diodo de tubo de vacío y el resultado fue el primer amplificador, el triodo. En los años que siguieron, la radio y la televisión dieron un gran estímulo a la industria de los bulbos. La producción se elevó de aproximadamente 1 millón de bulbos en 1922 a cerca de 100 millones en 1937. A principios de la década de 1930 el tetrodo de cuatro elementos y el pentodo de cinco tuvieron un rol destacado en la industria de los bulbos de electrones. En años posteriores, la industria llegó a ser una de las de primordial importancia y de rápido avance en el diseño, técnicas de fabricación, aplicaciones de alta potencia y alta frecuencia, así como en la miniaturización.

El 23 de diciembre de 1947, sin embargo, la industria de la electrónica iba a experimentar el advenimiento de una dirección completamente nueva en cuanto a interés y desarrollo. Fue en la tarde de este día en que Walter H. Brattain y John Bardeen demostraron la acción amplificadora del primer transistor en los laboratorios Bell. El transistor original (un transistor de punto de contacto) se muestra en la figura 3.1. Las ventajas de este dispositivo de estado sólido de tres terminales sobre el bulbo fueron obvias de inmediato. Era más pequeño y más liviano; no tenía que calentarse ni perdía calor; su construcción era robusta; era más eficiente, puesto que el dispositivo consumía menos potencia; estaba disponible al instante para su uso, ya que no requería un periodo de calentamiento, y se podían obtener voltajes de operación más bajos. Observe que este capítulo es nuestro primer análisis de dispositivos con tres o más terminales. Encontrará que todos los amplificadores (dispositivos que incrementan el nivel de voltaje, corriente o potencia) tienen tres terminales, de las cuales una controla el flujo entre las otras dos.

## Construcción de un transistor

El transistor es un dispositivo semiconductor de tres capas que consta de dos capas de material tipo n y una de material tipo p o de dos capas de material tipo p y una de material tipo n. El primero se llama transistor npn y el segundo transistor pnp. Con la polarización de cd apropiada. En el capítulo 4 veremos que la polarización de cd es necesaria para establecer la región de operación apropiada para la amplificación de ca. La capa del emisor está muy dopada, la base ligeramente, y el colector sólo un poco dopado. Los grosores de las capas externas son mucho mayores que las del material tipo p o n emparedado. Para los transistores la relación entre el grosor total y el de la capa central es de 0.150/0.001 150:1. El dopado de la capa emparedada también es considerablemente menor que el de las capas externas (por lo común de 10:1 o menor). Este menor nivel de dopado reduce la conductividad (incrementa la resistencia) de este material al limitar el número de portadores “libres”.

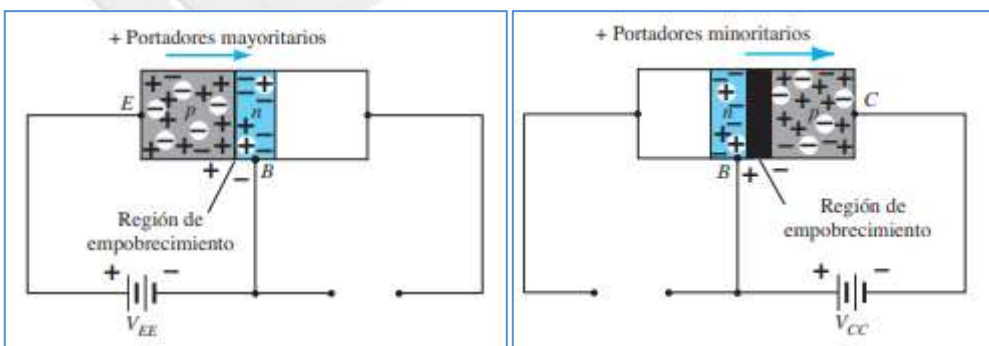
Con la polarización, las terminales se identificaron por medio de las letras mayúsculas E para emisor, C para colector y B para base. La conveniencia de esta notación se pondrá de manifiesto cuando analicemos la operación básica del transistor. La abreviatura BJT (de bipolar junction transistor) se suele aplicar a este dispositivo de tres terminales. El término bipolar refleja el hecho de que huecos y electrones participan en el proceso de inyección hacia el material opuestamente polarizado. Si se emplea sólo un portador (electrón o hueco), se considera que es un dispositivo unipolar. El diodo Schottky del capítulo 16 pertenece a esa clase.



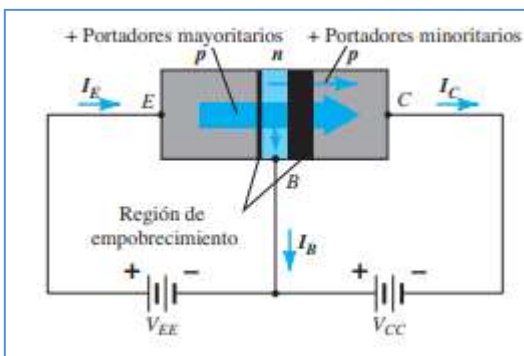
## Operación del transistor

A continuación describiremos la operación básica del transistor utilizando el transistor pnp. La operación del transistor npn es exactamente la misma con los roles de los electrones y huecos intercambiados. Se volvió a dibujar el transistor pnp sin polarización entre la base y el emisor. Observe las semejanzas entre esta situación y la del diodo polarizado en directa. El ancho de la región de empobrecimiento se redujo a causa de la polarización aplicada y el resultado fue un intenso flujo de portadores mayoritarios del material tipo p al material tipo n.

Eliminemos ahora la polarización de la base al emisor del transistor pnp a. Considere las semejanzas entre esta situación y la del diodo polarizado en inversa. Recuerde que el flujo de portadores mayoritarios es cero, y el resultado es sólo un flujo de portadores minoritarios, como se indica. En suma, por consiguiente: La unión p-n de un transistor se polariza en inversa en tanto que la otra se polariza en directa



Se aplicaron ambos potenciales de polarización a un transistor pnp, con los flujos de portadores mayoritarios y minoritarios resultantes indicados. Observe en la figura anterior los anchos de las regiones de empobrecimiento donde se ve con claridad cuál unión es polarizada en directa y cual lo está polarizada en inversa. Una gran cantidad de portadores mayoritarios se difundirá a través de la unión p–n polarizada en directa hacia el material tipo n. La pregunta es entonces si estos portadores contribuirán directamente con la corriente de base  $I_B$  o si pasarán directamente al material tipo p. Como el material tipo n emparedado es muy delgado y su conductividad es baja, un número muy pequeño de estos portadores tomarán esta ruta de alta resistencia hacia la base. La magnitud de la corriente de base es por lo general del orden de microamperes, en comparación con los miliamperes de las corrientes del emisor y el colector. El mayor número de estos portadores mayoritarios se difundirá a través de la unión polarizada en inversa hacia el material tipo n conectado al colector. La razón de la facilidad relativa con que los portadores mayoritarios pueden atravesar la unión polarizada en inversa es fácil de entender si consideramos que en el caso del diodo polarizado en inversa los portadores mayoritarios inyectados aparecerán como portadores minoritarios en el material tipo p. En otras palabras, ha habido una inyección de portadores minoritarios en el material tipo n de la región de la base. Si se combina esto con el hecho de que todos los portadores minoritarios de la región de empobrecimiento atravesarán la unión polarizada en inversa de un diodo explica el flujo.



Aplicando la ley de las corrientes de Kirchhoff al transistor como si fuera un nodo único obtenemos

$$I_E = I_C + I_B$$

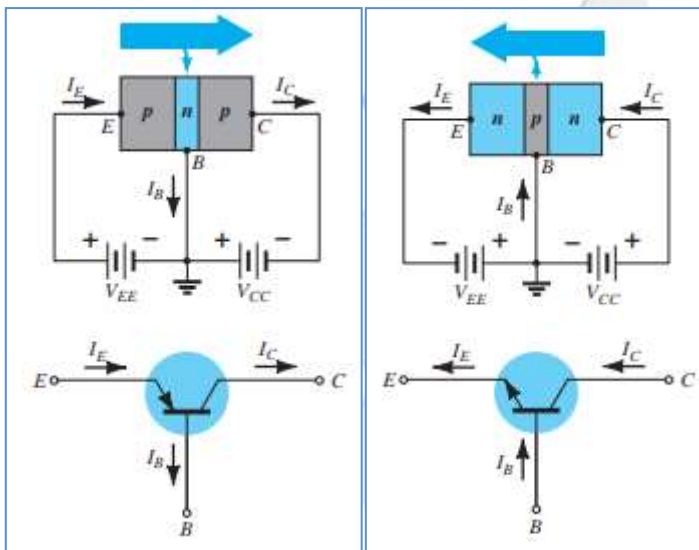
Y hallamos que la corriente en el emisor es la suma de las corrientes en el colector y la base. La corriente del colector, sin embargo, consta de dos componentes, los portadores mayoritarios y los minoritarios. El componente de corriente de portadores minoritarios se llama corriente de fuga y se le da el símbolo  $I_{CO}$  [corriente  $I_C$  con el emisor abierto (Open)]. La corriente del colector, por consiguiente, está determinada en su totalidad por

$$I_C = I_{C_{\text{mayoritarios}}} + I_{CO_{\text{minoritarios}}}$$

Para transistores de uso general, IC se mide en miliamperes e ICO en microamperes o nanoamperes. ICO, como la Is para un diodo polarizado en inversa, es sensible a la temperatura y hay que examinarla con cuidado cuando se consideren aplicaciones de amplios intervalos de temperatura. Puede afectar severamente la estabilidad de un sistema a alta temperatura si no se considera como es debido. Mejoras en las técnicas de construcción han reducido significativamente los niveles de ICO, al grado en que su efecto a menudo puede ser ignorado.

### Configuración en base común

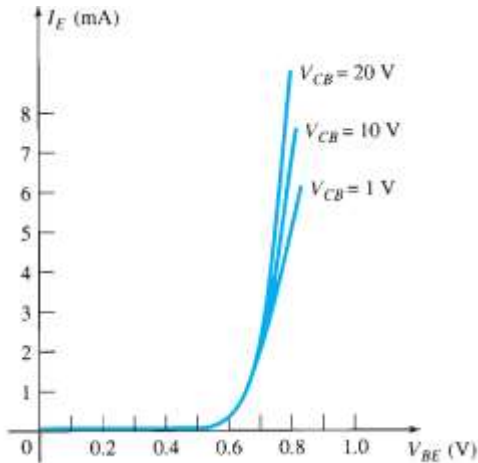
La notación y símbolos utilizados junto con el transistor en la mayoría de los textos y manuales publicados en la actualidad. Para la configuración de base común con transistores pnp y npn. La terminología en base común se deriva del hecho de que la base es común tanto para la entrada como para la salida de la configuración. Además, la base por lo general es la terminal más cercana a, o en, un potencial de tierra. A lo largo de este libro todas las direcciones de la corriente se referirán a un flujo convencional (de huecos) y no a uno de electrones. Esta opción se basó principalmente en el hecho de que la mayor parte de la literatura disponible en instituciones educativas e industriales emplea el flujo convencional, y las flechas en todos los símbolos electrónicos tienen una dirección definida de acuerdo con esta convención. Recuerde que la flecha en el símbolo del diodo definía la dirección de conducción de corriente convencional. Para el transistor:



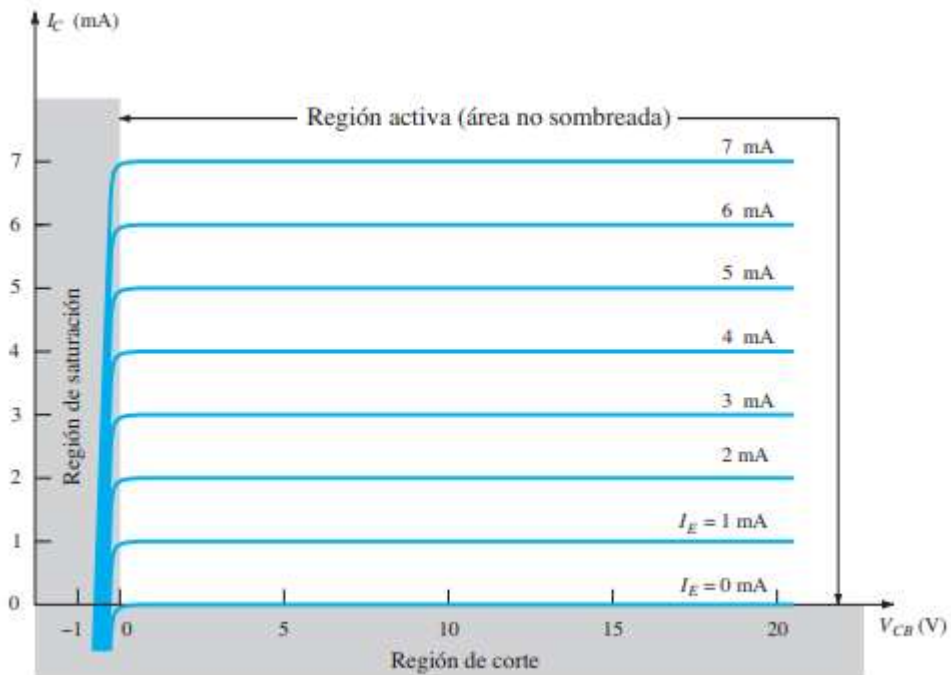
Todas las direcciones de la corriente que aparecen son las direcciones reales como las define el flujo convencional. Observe en cada caso que IE IC ID, y también que la polarización aplicada (fuentes de voltaje) es tal como para establecer corriente en la dirección indicada en cada rama. Es decir, compare la dirección de IE con la polaridad de VEE con cada configuración y la dirección de IC con la polaridad de VCC.

Para describir plenamente el comportamiento de un dispositivo de tres terminales como el de los amplificadores en base común, se requieren dos conjuntos de características, uno para los parámetros de

entrada (punto de manejo) y el otro para el lado de salida. El conjunto de entrada para el amplificador en base común relaciona una corriente de entrada ( $I_E$ ) con un voltaje de entrada ( $V_{BE}$ ) para varios niveles de voltaje de salida ( $V_{CB}$ ).



El conjunto de salida relaciona una corriente de entrada ( $I_C$ ) con un voltaje de salida ( $V_{CB}$ ) para varios niveles de corriente de entrada ( $I_E$ ). La salida o conjunto de características del colector ofrece tres regiones básicas de interés, las regiones activa, de corte y saturación. La primera es la región que normalmente se emplea para amplificadores lineales (sin distorsión). En particular: En la región activa la unión base-emisor se polariza en directa, en tanto que la unión colector-base se polariza en inversa.



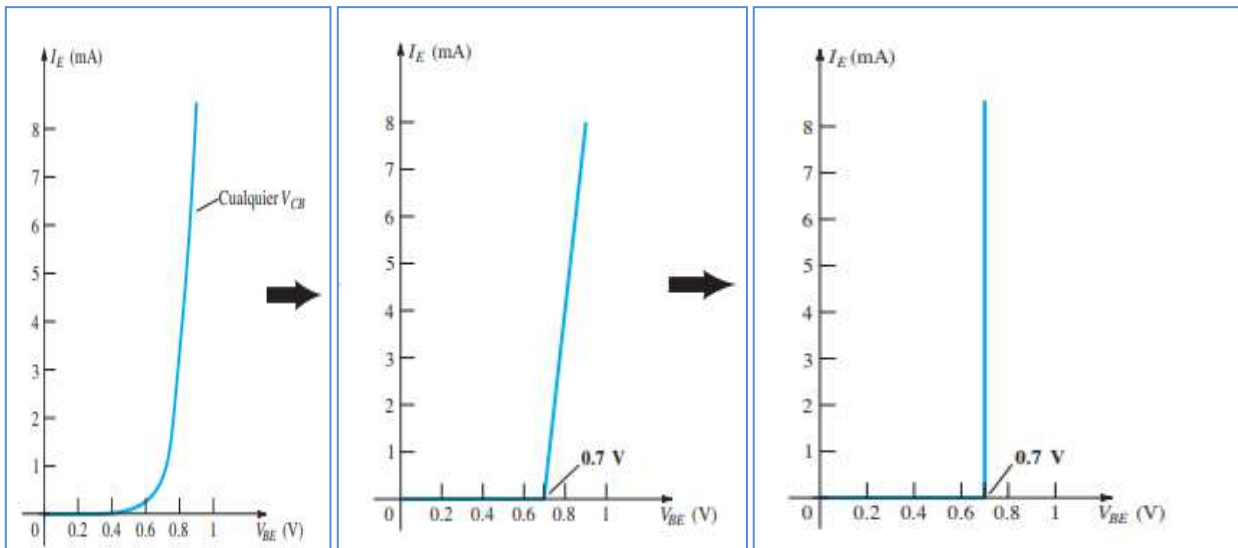
Las modalidades de polarización definen la región activa. En el extremo inferior de la región activa la corriente en el emisor ( $I_E$ ) es cero y el colector es simplemente el que produce la corriente de saturación en inversa  $I_{CO}$ . La corriente  $I_{CO}$  es tan pequeña (microamperes) en magnitud en comparación con la escala vertical de  $I_C$  (miliamperios), que aparece virtualmente sobre la misma línea horizontal que  $I_C = 0$ . Las condiciones que se dan en el circuito cuando  $I_E = 0$  con la configuración de base común. La notación que se usa con más frecuencia para  $I_{CO}$  y que aparece en hojas de datos y especificaciones,  $I_{CBO}$ . Debido a las técnicas de construcción mejoradas, el nivel de  $I_{CBO}$  para transistores de uso general (especialmente de silicio) en los intervalos de baja y mediana potencia en general es tan bajo que su efecto puede ser ignorado. Sin embargo, para unidades de alta potencia  $I_{CBO}$  se mantendrá en el intervalo de los miliamperes. Además, tenga en cuenta que  $I_{CBO}$ , al igual que  $I_S$ , para el diodo (ambas corrientes de fuga en inversa) es sensible a la temperatura. A temperaturas más altas el efecto de  $I_{CBO}$  puede llegar a ser un factor importante por su rápido incremento con la temperatura.

A medida que la corriente en el emisor se incrementa por encima de cero, la corriente del colector aumenta a una magnitud igual en esencia a la de la corriente del emisor, como lo determinan las relaciones de corriente básicas para el transistor. Observe también el efecto casi insignificante de VCB en la corriente a través del colector para la región activa. Las curvas indican con claridad que una primera aproximación a la relación de  $I_E$  e  $I_C$  en la región activa está dada por

$$I_C \cong I_E$$

Como su nombre lo dice, la región de corte se define como aquella donde la corriente en el colector es de 0 A. Además: En la región de corte las uniones base-emisor y colector-base de un transistor se polarizan en inversa. La región de saturación se define como aquella región de las características a la izquierda de VCB = 0. La escala horizontal en esta región se amplió para mostrar con claridad el cambio dramático de las características en esta región. Observe el incremento exponencial de la corriente del colector al incrementarse el voltaje VCB hacia 0 V. En la región de saturación las uniones base-emisor y colector-base se polarizan en directa. Las características de entrada revelan que para valores fijos de voltaje en el colector (VCB), a medida que se incrementa el voltaje base a emisor, la corriente del emisor se incrementa en una forma muy parecida a las características del diodo. De hecho, los niveles cada vez mayores de VCB tienen un efecto tan pequeño en las características, que como una primera aproximación el cambio producido por los cambios de VCB puede ser ignorado y entonces trazar las características. Si aplicamos el método lineal por segmentos, resultan las características. Si damos un paso más adelante e ignoramos la pendiente de la curva y, por consiguiente, la resistencia asociada con la unión polarizada en directa, Para todos los análisis de cd de redes con transistores a seguir en este libro emplearemos el modelo equivalente. Es decir, una vez que un transistor se “enciende”, supondremos que el voltaje base-emisor será el siguiente:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$



En otras palabras, el efecto de las variaciones producidas por VCB y la pendiente de las características de entrada se omitirán cuando analicemos redes con transistores para obtener una respuesta real sin que nos involucremos demasiado con variaciones de parámetros de menor importancia

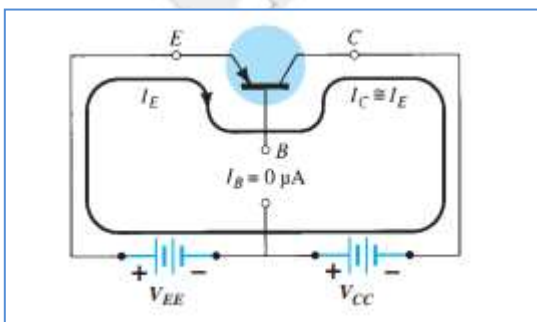
Alfa ( )

En el modo cd los niveles de IC e IE originados por los portadores mayoritarios están relacionados por una cantidad llamada alfa definida por la siguiente ecuación:

$$\alpha_{cd} = \frac{I_C}{I_E}$$

## Polarización

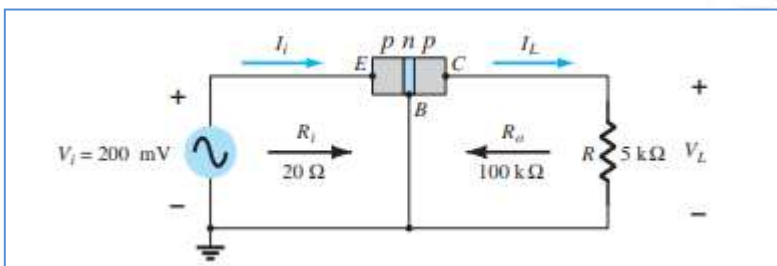
La polarización apropiada de la configuración de base común en la región activa se determina de inmediato con la aproximación y suponiendo por el momento que el resultado es la configuración del transistor pnp. La flecha del símbolo define la dirección del flujo convencional de las fuentes de cd se insertan entonces con una polaridad que soporte la dirección resultante de la corriente. Para el transistor npn las polaridades se invertirán.



Algunos estudiantes sienten que pueden recordar si la flecha del símbolo del dispositivo apunta hacia dentro o hacia fuera haciendo que coincidan las letras del tipo de transistor con las de las frases “apunta hacia dentro” o “no apunta hacia dentro”. Por ejemplo, hay una coincidencia entre las letras npn y las letras en cursiva de no apunta hacia dentro, así como en las letras pnp con “apunta hacia dentro” (pointing in).

### Acción amplificadora del transistor

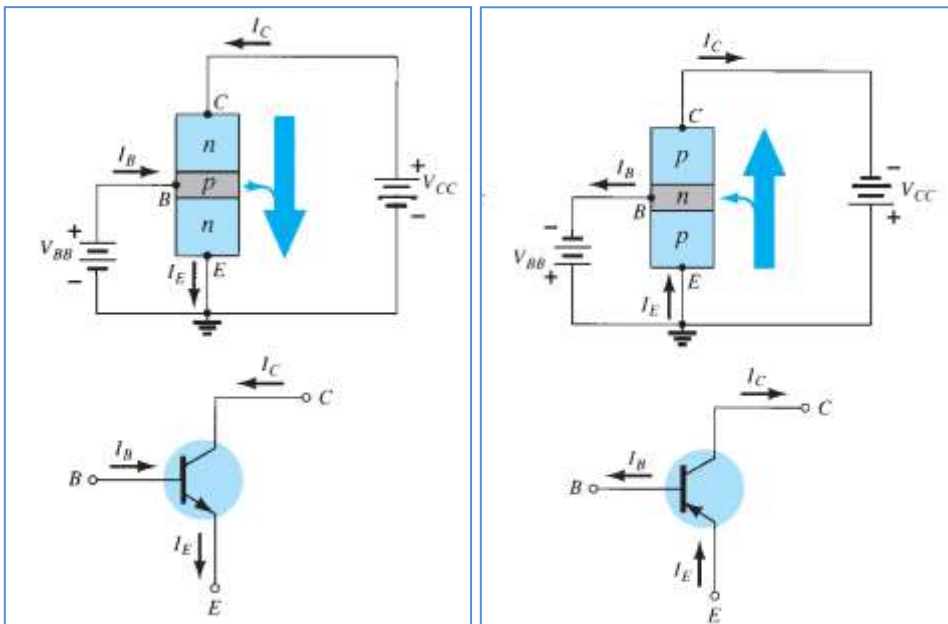
Ahora que se ha establecido la relación entre  $I_C$  e  $I_E$ , podemos introducir la acción amplificadora del transistor a un nivel superficial utilizando la red. La polarización de cd no aparece en la figura puesto que nuestro interés se limitará a la respuesta de ca. Por lo que se refiere a la configuración de base común la resistencia de entrada de ca determinada por las características es muy pequeña y por lo regular varía de  $10 \text{ } \Omega$  a  $100 \text{ } \Omega$ . La resistencia de salida determinada por las curvas es bastante alta (cuanto más horizontales son las curvas, más alta es la resistencia) y por lo general varía de  $50 \text{ k}\Omega$  a  $1 \text{ M}\Omega$ . La diferencia en la resistencia se debe a la unión polarizada en directa a la entrada (base a emisor) y a la unión polarizada en inversa en la salida (base a colector). Con un valor común de  $20 \text{ } \Omega$ , vemos que



$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200 \text{ mV}}{20 \text{ } \Omega} = 10 \text{ mA}$$

### Configuración en emisor común

La configuración de transistor que más frecuentemente se encuentra aparece para los transistores pnp y npn. Se llama configuración en emisor común porque el emisor es común o sirve de referencia para las terminales de entrada y salida (en este caso es común para las terminales base y colector). De nueva cuenta se requieren dos conjuntos de características para describir plenamente el comportamiento del la configuración en emisor común: uno para el circuito de entrada o de base-emisor y uno para el circuito de salida o de colector-emisor.



Las corrientes de emisor, colector y base se muestran en su dirección convencional real. Aun cuando la configuración del transistor cambió, las relaciones de corriente previamente desarrolladas para la configuración en base común siguen siendo válidas. Es decir  $I_E = I_C + I_B$  e  $I_C = \beta I_B$

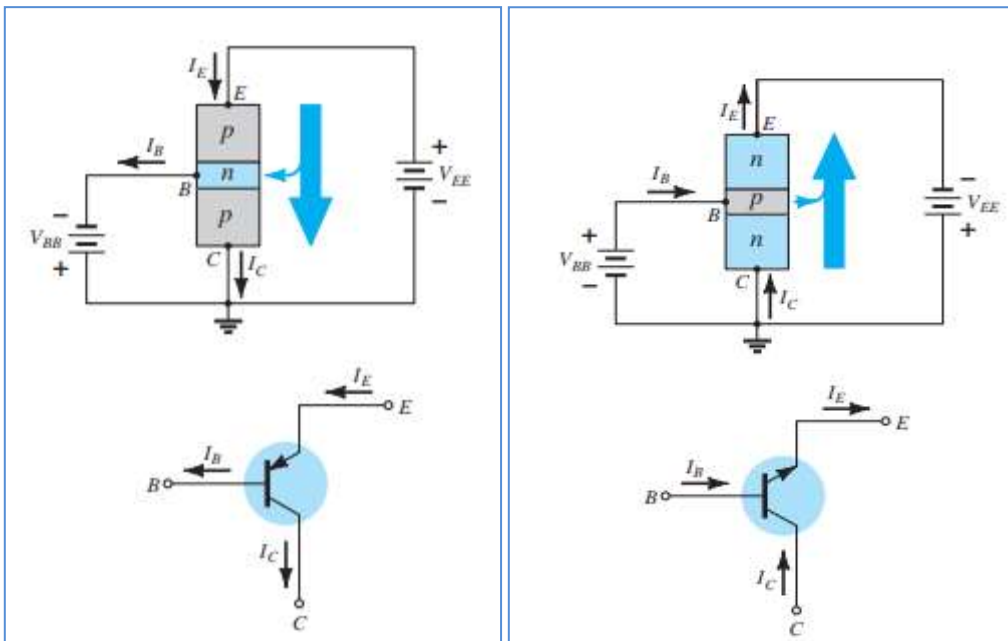
Para la configuración en emisor común, las características de salida son una gráfica de la corriente de salida ( $I_C$ ) con el voltaje de salida ( $V_{CE}$ ) para un intervalo de valores de la corriente de entrada ( $I_B$ ). Las características de entrada son una gráfica de la corriente de entrada ( $I_B$ ) contra el voltaje de entrada ( $V_{BE}$ ) para un intervalo de valores del voltaje de salida ( $V_{CE}$ ).

Observe que en las características de la magnitud de  $I_B$  está en microamperes en comparación con los miliamperes de  $I_C$ . Consideremos también que las curvas de  $I_B$  no son tan horizontales como las obtenidas para  $I_E$  en la configuración en base común, lo que indica que el voltaje colector a emisor influye en la magnitud de la corriente del colector.

La región activa para la configuración en emisor común es esa parte del cuadrante superior derecho de mayor linealidad, es decir, la región de las curvas de  $I_B$  son casi rectas o y equidistantes. Esta región existe a la derecha de las líneas de rayas vertical en  $V_{CEsat}$  y arriba de la curva de  $I_B$  igual a cero. La región a la izquierda de  $V_{CEsat}$  se llama región de saturación.

### Configuración en colector común

La tercera y última configuración del transistor es la configuración en colector común, mostrada en la con las direcciones de la corriente y notación de voltaje correctas. La configuración en colector común se utiliza sobre todo para igualar impedancias, puesto que tiene una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, lo contrario de las configuraciones en base común y en emisor común.



Una configuración de circuito en colector común aparece con el resistor de carga conectado desde el emisor a tierra. Observe que el colector está unido a tierra aun cuando el transistor esté conectado del mismo modo que en la configuración en emisor común. Desde un punto de vista de diseño, no se requiere un conjunto de características en colector común para seleccionar los parámetros del circuito de la figura anterior. Se puede diseñar utilizando las características en emisor común. En la práctica, las características de salida de la configuración en colector común son las mismas de la configuración en emisor común. Para la configuración en colector común las características de salida son una gráfica de  $I_E$  contra  $V_{CE}$  con un rango de valores de  $I_B$ . La corriente de entrada es, por consiguiente, la misma tanto con las características en emisor común como en colector común. Por último, ocurre un cambio casi imperceptible en la escala vertical de  $I_C$  de las características en emisor común si  $I_C$  se reemplaza con  $I_E$  para las características en colector común (puesto que). Para el circuito de entrada de la configuración en colector común bastan las características básicas en emisor común para obtener la información requerida.

### Límites de operación

Para cada transistor hay una región de operación en las características que garantizará que no se excedan las capacidades nominales máximas y que la señal de salida exhiba distorsión mínima. Dicha región se definió para las características del transistor.

Algunos de los límites de operación se explican por sí solos, como la corriente máxima del colector (normalmente aparece en la hoja de especificaciones como corriente continua en el colector) y el voltaje máximo del colector al emisor (a menudo abreviado  $V_{CE0}$  o  $V_{(BR)CE0}$  en la hoja de especificaciones). Para el transistor, Imán se especificó como 50 mA y  $V_{CE0}$  como 20 V. La línea vertical en las características definida como  $V_{CEsat}$  especifica el  $V_{CE}$  mínimo que se puede aplicar sin caer en la región

no lineal llamada región de saturación. El nivel de  $V_{CEsat}$  está por lo común cerca de 0.3 V, especificado para este transistor. El nivel máximo de disipación lo define la siguiente ecuación:

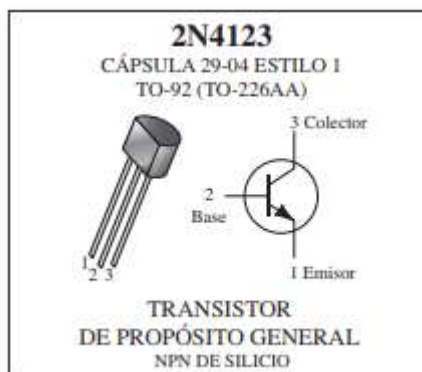
$$P_{C_{m\acute{a}x}} = V_{CE} I_C$$

## Hojas de especificaciones del transistor

Como la hoja de especificaciones es el vínculo de comunicación entre el fabricante y el usuario, es de particular importancia que la información provista se reconozca e intérprete correctamente. Aun cuando no se incluyeron todos los parámetros, un gran número de ellos son conocidos

Los restantes se introducirán en los capítulos siguientes. Se hará referencia entonces a esta hoja de especificaciones para repasar la forma en que se presenta el parámetro.

La información proporcionada como figura a continuación se tomó directamente de la publicación Small-Signal Transistors, FETs, and Diodes preparada por Motorola Inc. El 2N4123 es un transistor de propósito general con el encapsulado e identificación de las terminales. La mayoría de las hojas de especificaciones se dividen en valores nominales máximos, características térmicas y características eléctricas. Las características eléctricas se dividen a su vez en características de “encendido”,



## Probadores de transistores

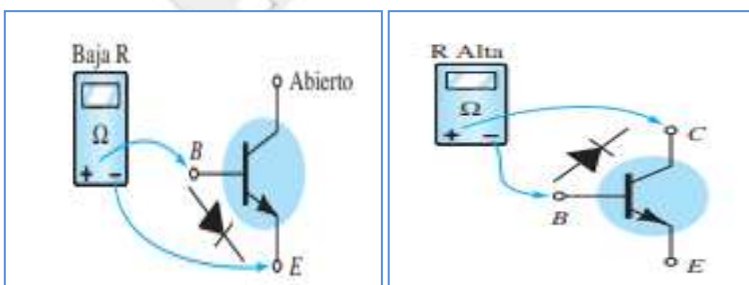
En el mercado hay disponibles varios probadores de transistores. Algunos simplemente forman parte de un medidor digital que puede medir varios elementos de una red. Otros, sirven para probar un número limitado de elementos. Se puede utilizar para probar transistores, JFET (capítulo 6) y SCR a la entrada y salida del circuito. En todos los casos primero hay que desconectar la potencia que llega al circuito donde está el elemento para que no se dañe la batería interna del probador y obtener una lectura correcta. Una vez insertado el transistor en el soporte de la derecha, puede mover el interruptor a través de todas las combinaciones posibles hasta que enciende la luz de prueba e identifica las terminales del transistor. El probador también indicará un OK si el transistor pnp está funcionando correctamente.

También se puede utilizar cualquier medidor con capacidad de verificación de diodos para comprobar el estado de un transistor. Con el colector abierto la unión base a emisor deberá producir un bajo voltaje de cerca de 0.7 V con el cable rojo (positivo) conectado a la base y el negro (negativo) conectado al emisor. La inversión de los cables produce una indicación OL para representar la unión polarizada en inversa. Asimismo, con el emisor abierto se pueden verificar los estados de polarización en directa y en inversa de la unión base a colector.



## Óhmetro

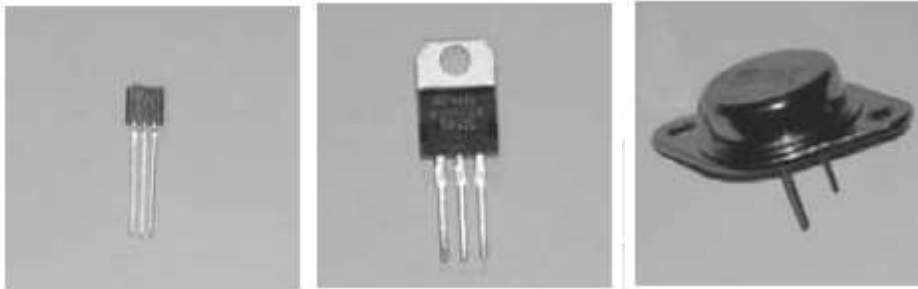
Se puede utilizar un óhmetro o las escalas de resistencia de un multímetro digital (DMM, por sus siglas en inglés) para verificar el estado de un transistor. Recuerde que para un transistor en la región activa la unión base a emisor está polarizada en directa y la unión base a colector está en inversa. En esencia, por consiguiente, la unión polarizada en directa deberá registrar una resistencia relativamente baja, en tanto que la unión polarizada inversa muestra una resistencia mucho más alta. Para un transistor npn, habrá que verificar la unión polarizada en directa (polarizada por la fuente interna en el modo de resistencia) de la base al emisor y la lectura por lo general quedará dentro del intervalo de 100  $\Omega$  a algunos kilo  $\Omega$ ; también la unión base a colector polarizada en inversa (de nuevo polarizada en inversa por la fuente interna), con una lectura por lo general de más de 100 k $\Omega$ . Para un transistor pnp los cables se invierten para cada unión. Obviamente, una alta o baja resistencia en ambas direcciones (al invertir los cables) en cualquier unión de un transistor npn o pnp indica un dispositivo defectuoso



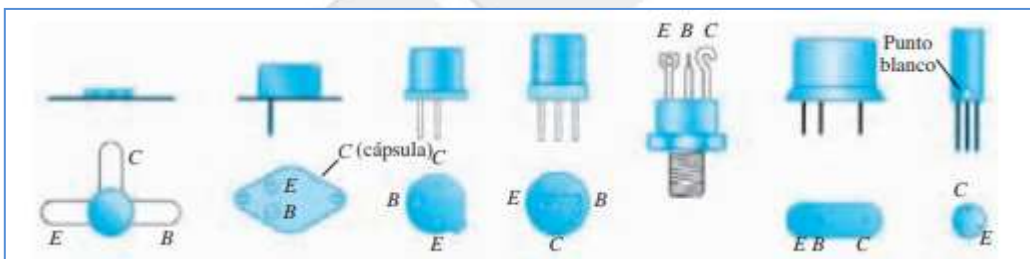
Si ambas uniones de un transistor dan las lecturas esperadas, también se puede determinar el tipo de transistor con sólo observar la polaridad de los cables al conectarlos a la unión base a emisor. Si el cable positivo (+) se conecta a la base y el negativo (-) al emisor, una lectura de baja resistencia indicaría un transistor npn. Una lectura de alta resistencia indicaría un transistor pnp. Aunque también se puede utilizar un óhmetro para determinar las terminales (base, colector y emisor) de un transistor, se supone que esta determinación puede hacerse observando la orientación de las terminales en la cápsula

### Encapsulado e identificación de las terminales de un transistor

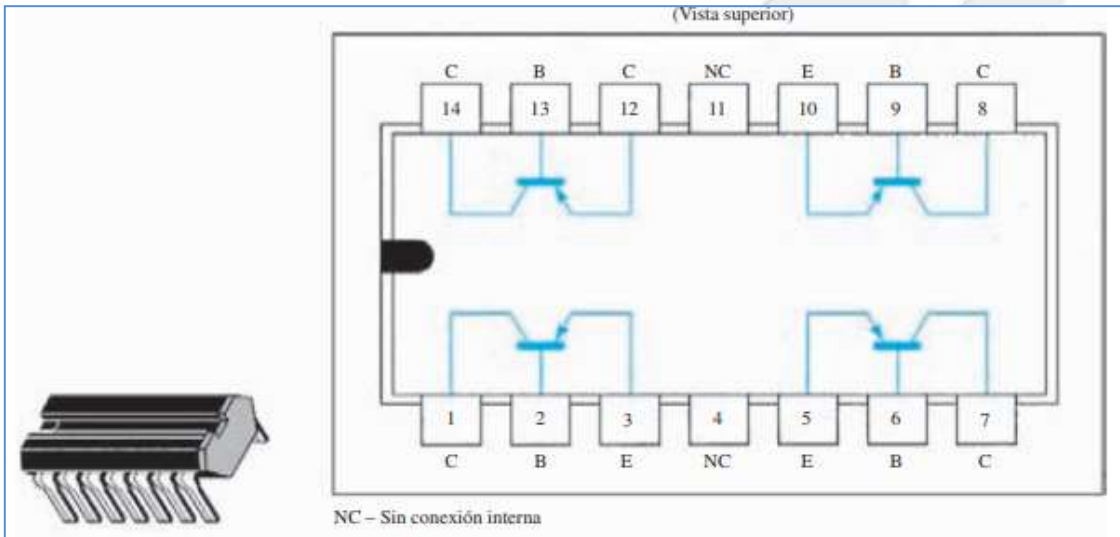
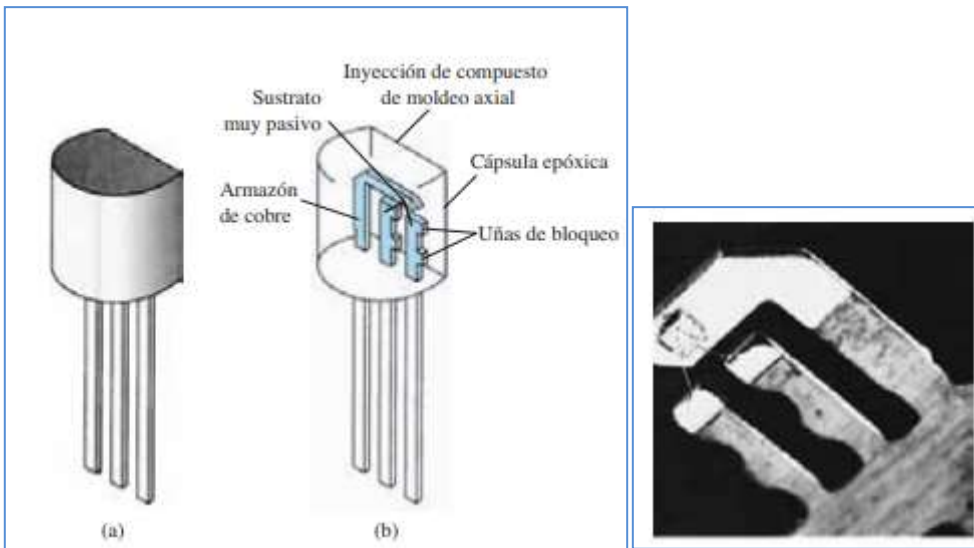
Una vez que se fabrica el transistor por medio de las técnicas descritas en el apéndice A, los conectores de, por lo general, oro, aluminio o níquel, se conectan y toda la estructura se encapsula en un contenedor. Los de construcción para trabajo pesado son dispositivos de alta potencia, en tanto que los de contenedor pequeño (casquete superior) o de cuerpo de plástico son para dispositivos de baja a mediana potencia.



Siempre que sea posible, la cápsula del transistor presentará alguna marca para indicar cuáles conectores están conectados al emisor, colector o base de un transistor. algunos métodos comúnmente utilizados.



En la figura anterior aparece la construcción interna de una cápsula TO-92 de la línea Fairchild. Observe el tamaño tan pequeño del dispositivo semiconductor real. Los hay con conectores dorados, armazón de cobre y encapsulado epóxido. Cuatro transistores de silicio pnp (quad) pueden estar alojados en la cápsula dos en línea de plástico de 14 terminales. Las conexiones de puntas internas aparecen en la figura. Como con la cápsula CI del diodo; la muesca en la superficie superior muestra el número 1 y 14 puntas

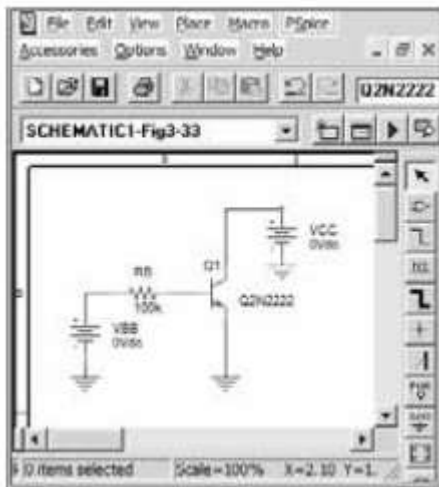


## Simulación Por Computadora

Como las características de transistor se introdujeron en este Ebook, parece apropiado analizar un procedimiento para obtener dichas características por medio de PSpice para Windows. Los transistores aparecen listados en la biblioteca EVAL y se inicia con la letra Q. La biblioteca incluye dos transistores npn, dos pnp y dos configuraciones Darlington. El hecho de que haya una serie de curvas definidas por los niveles de IB requerirá que se realice una barrido de valores de IB (un barrido anidado) dentro de un barrido de voltajes de colector a emisor. Sin embargo, esto no es necesario para el diodo, ya que sólo resultaría una curva.

En primarme lugar, dibujar la red del capture de pantalla mostrado después del texto. El voltaje VCC establecerá nuestro barrido principal, en tanto que el voltaje VBB determinará el barrido anidado. Para

futura referencia, observe el panel arriba a la derecha de la barra de menús con el control de desplazamiento cuando construya redes. Esta opción le permite recuperar elementos que ya han sido utilizados en el pasado. Por ejemplo, si coloca un transistor después de haber colocado algunos elementos, simplemente regrese a la barra de desplazamiento y muévala hasta que aparezca el resistor R. Haga clic en el lugar una vez y el resistor aparecerá en la pantalla.

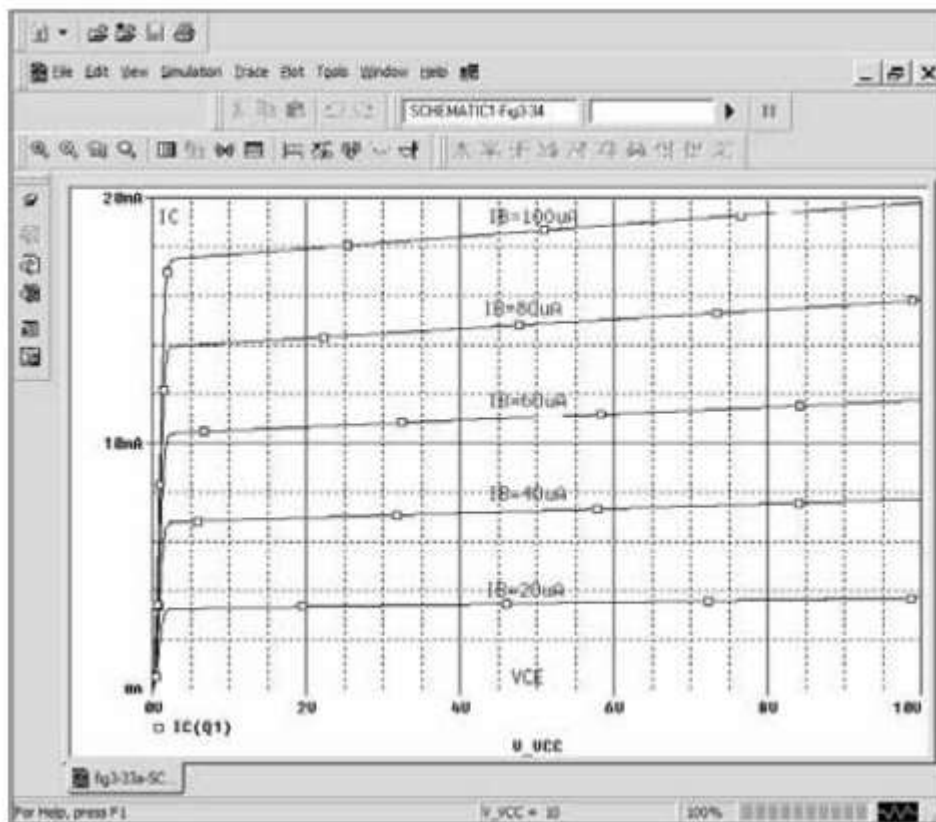


Una vez dibujada la red como aparece en la figura, seleccione New Simulation Profile e inserte Figura como Nombre (Name). Luego seleccione Create (Crear) para obtener el cuadro de diálogo Simulation Settings (Ajuste para la simulación). El tipo de Análisis (Analysis type) será DC Sweep (Barrido de CD), con Voltage Source (Fuente de Voltaje) como la variable de barrido (Sweep variable). Inserte VCC como el nombre de la fuente de voltaje de barrido y seleccione Linear (Lineal) para el barrido. El Valor de inicio (Start Value) es 0 V; el Valor final (End Value) 10 V, y el Incremento (Increment) 0.01 V. Es importante no seleccionar la x en la esquina superior derecha del cuadro para salir de los ajustes de control. Primero debemos ingresar la variable de barrido seleccionando Secondary Sweep (Barrido secundario) e insertar VBB como la fuente de voltaje a ser barrida. De nuevo, será un barrido Lineal (Linear), pero ahora el valor de inicio será 2.7 V correspondiente a una corriente inicial de 20 mA determinada como

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{2.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 20 \mu\text{A}$$

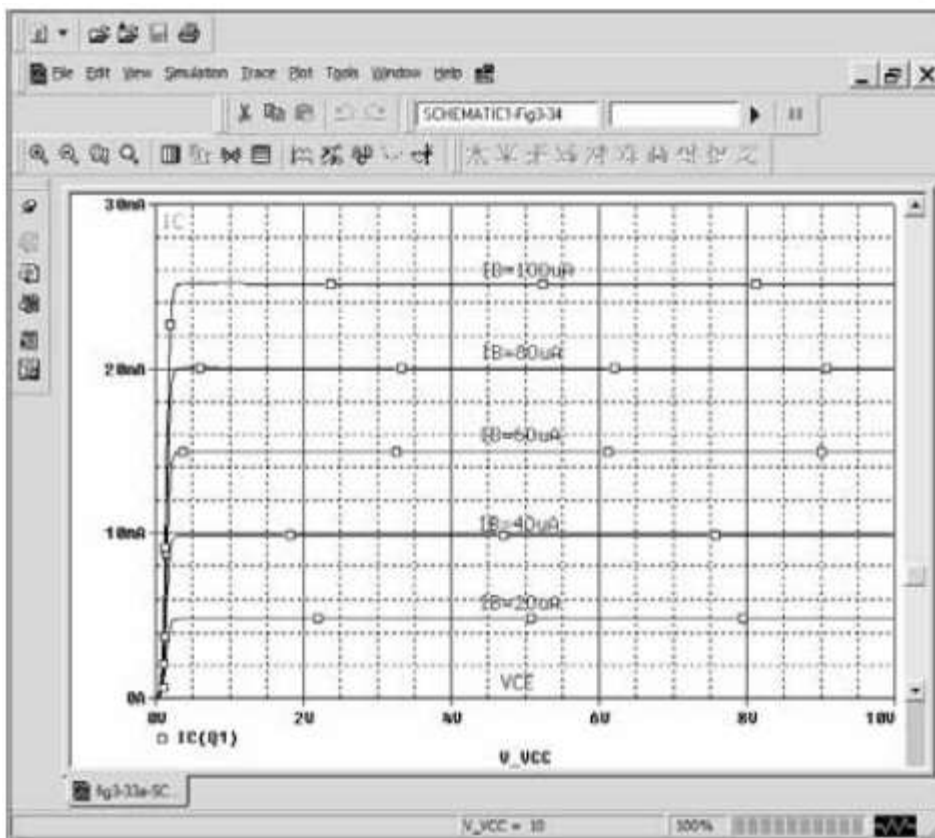
El Valor final (End value) es de 0.7 V correspondiente a una corriente de 100 mA. El Incremento (Increment) se ajusta a 2 V, correspondiente a un cambio de la corriente en la base de 20 mA. Ahora ambos barridos están ajustados, pero antes de salir del cuadro de diálogo asegúrese de habilitar ambos barridos con una marca de verificación en la casilla junto a cada barrido. A menudo, después de ingresar el segundo barrido al usuario se le olvida establecer el segundo barrido antes de salir del cuadro de diálogo. Una vez activadas ambas casillas, salga del cuadro de diálogo y seleccione Initiate Simulation

(Iniciar simulación). El resultado será una gráfica con una VCC de voltaje que varía de 0 V a 10 V. Para establecer las diversas curvas de I, aplique la secuencia Trace-Add Trace (Trazar-Agregar Trazar) para obtener el cuadro de diálogo Add Trace. Seleccione IC(Q1), la corriente del colector del transistor para el eje vertical. Haga clic en OK y aparecerán las características. El problema es que se extienden de 10 mA a 20 mA en el eje vertical. Esto se puede corregir mediante la secuencia Plot-Axis Settings, la cual abre de nuevo el cuadro de diálogo Axis Settings. Seleccione Y-Axis y bajo Data Range seleccione User Defined y establezca el intervalo como 020 mA. Haga clic en OK y aparecerá la gráfica. Puede agregar las etiquetas en la gráfica aplicando la secuencia Plot-Label-Text para obtener el cuadro de diálogo Text Label. Ingrese IB 20 mA seguido de un clic en OK y aparecerá en rojo en la pantalla. Haga clic en el lugar y luego una vez más para guardarlo en la memoria. Repita el procedimiento para todas las demás etiquetas de la figura



Si la beta de ca aparece a la mitad de la gráfica, veremos que su valor es de cerca de 190, aun cuando Bf en la lista de especificaciones es de 255.9. De nuevo, al igual que el diodo, los demás parámetros del dispositivo tendrán un efecto perceptible en las condiciones de operación. Si regresamos a las especificaciones del transistor por medio de Edit.-PSpice-Model para obtener el cuadro de diálogo PSpice Model Editor Lite, podemos borrar todos los parámetros excepto el valor Cf. Asegúrese de dejar los paréntesis alrededor del valor de Bf durante el proceso de borrado. Al salir del cuadro de diálogo Model Editor9.2 se le pedirá que guarde los cambios. Queda guardado y el circuito se simuló de nuevo para obtener las características después de otro ajuste del intervalo del eje vertical.

Observe en primer lugar que todas las curvas son horizontales, lo que indica que el elemento carece de características resistivas. Además, una separación igual de las curvas revela que beta es la misma en cualquier parte. Utilizando una diferencia de 5 mA entre cualquiera de las dos curvas y dividiendo entre la diferencia de  $I_B$  de 20 mA, se obtiene una  $\beta$  de 250, que en esencia es la misma que la especificada para el dispositivo. El valor real del procedimiento anterior es reconocer que aun cuando se puede proporcionar una beta, el desempeño real del dispositivo dependerá en gran medida de sus otros parámetros. Suponer un dispositivo ideal siempre es un buen punto de partida, aunque una red real proporciona resultados diferentes.



## Evaluación

### Parte II

#### Construcción de un transistor

1. ¿Qué nombres se aplican a los dos tipos de transistores BJT? Trace la construcción básica de cada uno y marque los varios portadores minoritarios y mayoritarios en cada uno. Trace el símbolo gráfico junto a cada uno. ¿Cambia cualquier parte de esta información al cambiar de silicio a germanio?

2. ¿Cuál es la diferencia principal entre un dispositivo bipolar y uno unipolar?

## Parte II

### Operación del transistor

3. ¿Cómo se deben polarizar las dos uniones de transistor para la correcta operación de amplificador del transistor?
4. ¿Cuál es la fuente de la corriente de fuga en un transistor?

## Parte II

### Configuración en base común

10. De memoria, trace el símbolo de los transistores pnp y npn y luego inserte el flujo convencional de cada corriente.

## Parte IV

### Acción amplificadora del transistor

17. Calcule la ganancia de voltaje ( $A_v$ , Volví) para la red. Si  $V_i$  500 mV y  $R$  1 k $\Omega$ . (Los demás valores del circuito no cambian.)
18. Calcule la ganancia de voltaje ( $A_v$ , Volví) para la red .si la resistencia interna de la fuente es de 100  $\Omega$  en serie con

## Parte V

### Configuración en emisor común

19. Defina  $I_{CBO}$  e  $I_{CEO}$ . ¿En qué son diferentes? ¿Cómo están relacionadas? ¿Son en general de magnitud parecida?

## Conclusiones

1. Los dispositivos semiconductores tienen las siguientes ventajas sobre los tubos de vacío o bulbos.

Son (1) más pequeños, (2) más livianos, (3) más robustos, y (4) más eficientes. Además, no requieren (1) calentamiento, (2) ni calentador, y conducen (3) voltajes de operación más bajos.

2. Los transistores son dispositivos de tres terminales de tres capas semiconductoras que resumen 155 una base o capa central mucho más delgada que las otras dos. Las dos capas externas son de materiales tipo n o p, con la capa emparejada de tipo opuesto.

3. Una unión p-n de un transistor se polariza en directa, en tanto que la otra se polariza en inversa.

4. La corriente directa en el emisor siempre es la corriente más grande de un transistor, en tanto que la corriente de la base es la más pequeña. La corriente en el emisor siempre es la suma de las otras dos.

5. La corriente del colector consta de dos componentes: el componente mayoritario y la corriente minoritaria (también llamada corriente de fuga).

6. La flecha en el símbolo del transistor define la dirección del flujo de corriente convencional en el emisor y por lo cual define la dirección de las otras corrientes del dispositivo.

7. Un dispositivo de tres terminales requiere dos conjuntos de características para definir por completo sus características.

8. En la región activa de un transistor, la unión base-emisor se polariza en directa, en tanto que la unión colector-base se polariza en inversa.

9. En la región de corte las uniones base-emisor y colector-base se polarizan en inversa. En la región de saturación las uniones base-emisor y colector-base se polarizan en directa.

10. Independientemente de en qué tipo de configuración se utilice un transistor, las relaciones básicas entre las corrientes siempre son las mismas y el voltaje de la base al emisor es el valor de umbral si el transistor está en el estado de "encendido".

11. El punto de operación define dónde operará el transistor en sus curvas de características en condiciones de cd. Para amplificación lineal (distorsión mínima), el punto de operación de cd no deberá estar demasiado cerca de los valores nominales máximos de potencia, voltaje o corriente, y deberán evitarse las regiones de saturación y corte.

12. Para la mayoría de las configuraciones, el análisis se inicia determinando la corriente de base.

13. Para el análisis de una red de transistores, todos los capacitores se reemplazan por un equivalente de circuito abierto.

14. La configuración de polarización fija es la más simple de las configuraciones de polarización de transistores, aunque también es bastante inestable debido a la sensibilidad de la beta en el punto de operación.
15. La determinación de la corriente del colector de saturación (máxima) para cualquier configuración en general es fácil de realizar si se sobrepone un cortocircuito imaginario entre el colector y el emisor del transistor. Entonces la corriente resultante a través del corto es la corriente de saturación
16. La ecuación de la recta de carga de una red de transistores se determina aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff a la salida o a la red de colector. El punto Q se determina entonces localizando la intersección entre la corriente de base y la recta de carga trazada en las características del dispositivo.
17. La configuración de polarización estabilizada por emisor es menos sensible a los cambios de beta, por lo que proporciona más estabilidad para la red. Tenga en cuenta, sin embargo, que cualquier resistencia en el emisor es “vista” en la base del transistor como un resistor más grande; un hecho que reducirá la corriente de base de la configuración.
18. La configuración de polarización del divisor de voltaje es quizá la más común de todas las configuraciones. Su popularidad se debe principalmente a su baja sensibilidad a los cambios de beta de un transistor a otro del mismo lote (con la misma etiqueta de transistor). Se puede aplicar el análisis exacto a cualquier configuración, aunque el aproximado sólo se puede aplicar si la resistencia de emisor reflejada vista en la base es mucho mayor que el resistor de menor valor de la configuración de polarización del divisor de voltaje conectada a la base del transistor.
19. Al analizar la polarización de cd con una configuración de realimentación de voltaje, asegúrese de recordar que tanto el resistor de emisor como el resistor de colector se reflejan de vuelta en el circuito de base por beta. La mínima sensibilidad a beta se obtiene cuando la resistencia reflejada es mucho mayor que el resistor de realimentación entre la base y el colector.
20. Para la configuración de base común normalmente se determina la corriente de emisor por la presencia de la unión base a emisor en la misma malla. Entonces se emplea el hecho de que las corrientes de emisor y colector son esencialmente de la misma magnitud.
21. En general, una clara comprensión del procedimiento empleado para analizar una red con un transistor en cd permitirá un diseño de la misma configuración con un mínimo de dificultad y confusión. Basta que comience con las relaciones que reducen al mínimo el número de incógnitas y luego tome algunas decisiones sobre los elementos desconocidos de la red.
22. En una configuración de conmutación, un transistor cambia con rapidez entre la saturación y el corte, o viceversa. En esencia, la impedancia entre el colector y el emisor se puede representar de forma aproximada como un cortocircuito en el caso de saturación y como circuito abierto en el caso de corte.

23. Cuando verifique la operación de una red de transistor de cd, primero compruebe que el voltaje de la base al emisor es de cerca de 0.7 V y que el voltaje del colector al emisor es de entre 25% y 75% del voltaje aplicado VCC. 15. El análisis de la configuración pnp es exactamente el mismo que se aplicó a transistores npn excepto que las direcciones de la corriente se invierten su valor nominal.

## Recomendaciones

### Al estudiante.

Aprender electrónica es interesante y (con optimismo) divertido. Sin embargo, también es un trabajo duro, ya que el conocimiento y las habilidades que se pretenden encontrar sólo podrán adquirirse a través de la práctica. Les ofrecemos algunas directrices

1. Conforme avance en el material, trate de adquirir una noción de dónde proviene la teoría; por ejemplo, las leyes básicas experimentales en las cuales se basa. Esto le ayudará a entender mejor las ideas principales sobre las cuales está construida la teoría.
2. Aprenda la terminología y las definiciones. Con frecuencia se introducen nuevos conceptos importantes. Aprenda qué significan y dónde se usan.
3. Estudie cada sección con detenimiento y asegúrese de que ha entendido las ideas básicas y de qué manera se conectan unas con otras. Trabaje a su ritmo a lo largo de los ejemplos con su calculadora. Intente resolver los problemas de práctica y luego los problemas al final de cada tema. No entenderá todos los conceptos de inmediato, la mayoría requerirán varias lecturas antes de que consiga tener un entendimiento adecuado.
4. Cuando esté listo, ponga a prueba sus conocimientos con los Problemas intermedios de verificación de aprendizaje que se incluyen en cada capítulo.
5. Cuando domine el material, siga adelante con el siguiente bloque. Para aquellos conceptos con los que tiene dificultad, consulte a su profesor o alguna otra fuente con conocimiento de la materia.
6. Necesitará una buena calculadora científica con la cual llegará a dominar de manera más fácil los aspectos numéricos de la solución de problemas, de este modo tendrá más tiempo para concentrarse en la teoría.

## Bibliografía

1. BOYLESTAD, Robert. "Electrónica. Teoría de Circuitos". Editorial Prentice Hall. Sexta Edición. México.1996.

