

Transistores bipolares

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Conocer las relaciones entre las corrientes de base, de emisor y de colector de un transistor bipolar.
- Trazar un esquema de un circuito configurado en emisor común y determinar cada terminal, tensión y resistencia.
- Dibujar una hipotética característica de entrada y una familia de características de salida, identificando ambos ejes.
- Reconocer las tres zonas de funcionamiento sobre la curva de colector de un transistor bipolar.
- Indicar las características del transistor ideal y las de la segunda aproximación.
- Enumerar algunas de las limitaciones de funcionamiento del transistor bipolar que deben ser usadas por un técnico.

VOCABULARIO

- | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| • alfa de continua (α_{dc}) | • diodo emisor | • transistor de pequeña señal |
| • base | • disipador de calor | • transistor de potencia |
| • base común (BC) | • emisor | • transistor de unión |
| • beta de continua (β_{dc}) | • emisor común (EC) | • trazador de curvas |
| • circuito de conmutación | • ganancia de corriente | • zona activa |
| • circuito integrado | • parámetro h | • zona de ruptura |
| • colector | • región de corte | • zona de saturación |
| • colector común (CC) | • resistencia térmica | |
| • diodo colector | • transistor bipolar | |

En 1951 William Shockley inventó el primer transistor de unión, un dispositivo semiconductor que permite amplificar señales electrónicas tales como señales de radio y de televisión. El transistor ha llevado a muchas otras invenciones basadas en semiconductores, incluyendo el circuito integrado (CI), un pequeño dispositivo que contiene miles de transistores miniaturizados. Gracias a los CI son posibles los ordenadores modernos y otros milagros electrónicos.

Este capítulo introduce el transistor bipolar, aquel que usa electrones libres y huecos. La palabra bipolar es una abreviatura de «dos polaridades»

6-1. EL TRANSISTOR SIN POLARIZACIÓN

Un transistor tiene tres zonas de dopaje, como se muestra en la Figura 6-1. La zona inferior se denomina **emisor**, la zona central es la **base** y la zona superior es el **colector**. El transistor de la Figura 6-1 es un dispositivo *npn* porque hay una zona *p* entre dos zonas *n*. Recordemos que los portadores

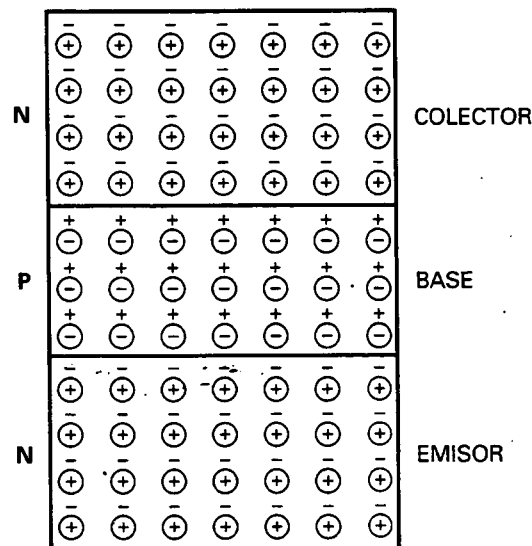


Figura 6-1. Estructura de un transistor.

mayoritarios son electrones libres en los materiales tipo *n* y huecos en los materiales tipo *p*.

Los transistores también se construyen como dispositivos *pn**p*. Un transistor *pn**p* tiene una zona *n* entre dos zonas *p*. Para evitar confusiones entre los transistores *n**p**n* y *p**n**p*, nuestra exposición inicial se centrará en el transistor *n**p**n*.

□ Niveles de dopaje

En la Figura 6-1 el emisor está fuertemente dopado. Por otro lado, la base está ligeramente dopada. El nivel de dopaje del colector es intermedio, entre los dos anteriores. Físicamente el colector es la zona más grande de las tres.

□ Diodos de emisor y de colector

El transistor de la Figura 6-1 tiene dos uniones: una entre el emisor y la base y otra entre la base y el colector. Por tanto, un transistor es similar a dos diodos contrapuestos. El diodo inferior se denomina el *diodo emisor-base*, o simplemente el **diodo emisor**. El diodo superior se denomina *diodo colector-base*, o **diodo colector**.

□ Antes y después de la difusión

La Figura 6-1 muestra las zonas del transistor antes de que ocurra la difusión. Como se vio en el Capítulo 2, los electrones libres de la zona *n* se difunden a través de la unión y se recombinan con los huecos del lado *p*. Imagínese los electrones libres de cada zona *n* atravesando la unión y recombinándose con los huecos. El resultado son las dos zonas de depleción mostradas en la Figura 6-2. En cada una de estas zonas la barrera de poten-

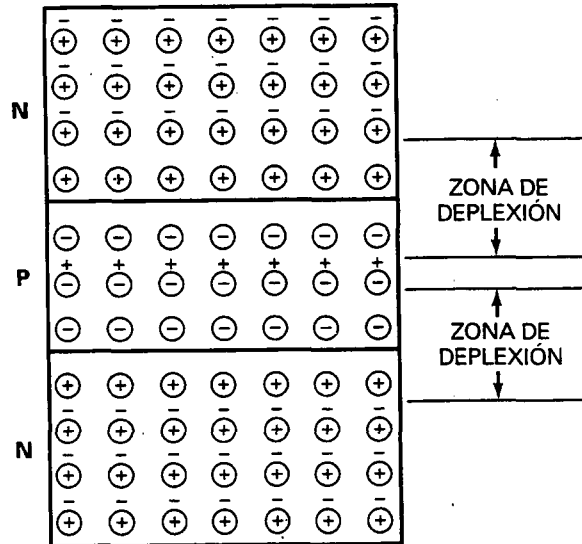


Figura 6-2. Zonas de depleción.

cial es aproximadamente de 0,7 V a 25 °C para un transistor de silicio (y 0,3 V a 25 °C para un transistor de germanio). Como en capítulos anteriores, nos centraremos en los dispositivos de silicio, ya que se utilizan mucho más que los dispositivos de germanio.

6-2. EL TRANSISTOR POLARIZADO

Un transistor sin polarización es similar a dos diodos contrapuestos. Cada diodo tiene una barrera de potencial de 0,7 V, aproximadamente. Si se conectan fuentes de tensión externas para polarizar al transistor, se obtienen corrientes a través de las diferentes partes del transistor.

□ Electrones del emisor

En la Figura 6-3 se muestra un transistor polarizado. Los signos menos representan electrones libres. El emisor está fuertemente dopado; su función consiste en emitir o inyectar electrones libres a la base. La base ligeramente dopada también tiene un propósito bien definido: dejar pasar hacia el colector la mayor parte de los electrones inyectados por el emisor. El colector se llama así porque colecta o recoge la mayoría de los electrones provenientes de la base.

La Figura 6-3 es la forma más habitual de polarizar un transistor. La fuente de la izquierda V_{BB} en la Figura 6-3 polariza directamente el diodo emisor, mientras que la fuente de la derecha V_{CC} polariza inversamente el diodo de colector. Aunque son posibles otros métodos de polarización, polarizar en directa el diodo emisor y en inversa el diodo colector produce los resultados más útiles.

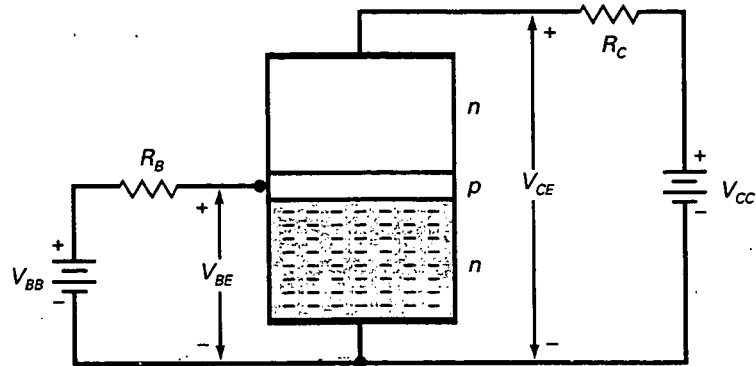


Figura 6-3. Transistor polarizado.

□ Electrones de la base

En el instante en que la polarización directa se aplica al diodo emisor de la Figura 6-3, los electrones del emisor todavía no han entrado en la zona de la base. Si V_{BB} es mayor que la barrera de potencial emisor-base de la Figura 6-3, circulará una elevada corriente de electrones del emisor hacia la base, como se ve en la Figura 6-4. Teóricamente estos electrones libres pueden circular en cualquiera de las dos direcciones siguientes: por una parte, pueden circular hacia la izquierda saliendo de la base, pasando a través de R_B en su camino hacia el terminal positivo de la fuente. Por otra parte, los electrones libres pueden circular hacia el colector.

¿Cuál es la trayectoria que siguen la mayor parte de los electrones libres? La mayoría de ellos seguirá el camino hacia el colector por dos razones; la primera es el débil dopaje de la base. Por esta causa, los electrones libres tienen una larga vida en la zona de la base; por tanto, tienen tiempo suficiente para llegar al colector. La segunda razón es que la *base es muy estrecha*, lo cual también permite a los electrones llegar con mayor facilidad al colector. Por estas dos razones, casi todos los electrones inyectados por el emisor pasan a través de la base al colector.

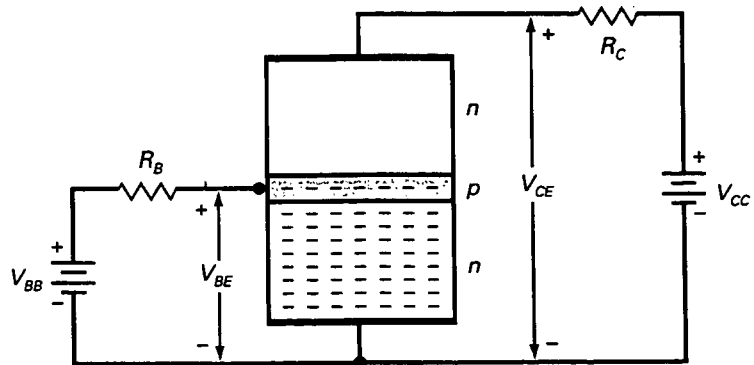


Figura 6-4. El emisor inyecta electrones libres en la base.

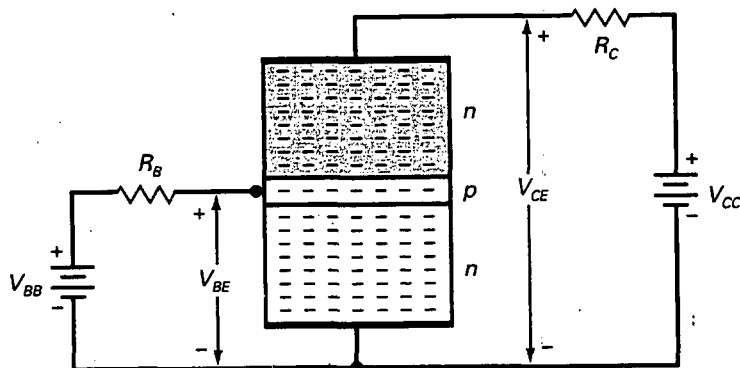


Figura 6-5. Los electrones libres de la base circulan hacia el colector.

Sólo unos pocos electrones libres se recombinarán con huecos en la base ligeramente dopada en la Figura 6-4. Después, como los electrones de valencia, circularán a través de la resistencia de base hacia el lado positivo de la fuente V_{BB} .

□ Electrones del colector

Casi todos los electrones libres van hacia el colector, como se ve en la Figura 6-5. Estando ya en el colector, son atraídos por la fuente de tensión V_{CC} . Como consecuencia de ello, los electrones libres circulan a través del colector y a través de R_C hasta que alcanzan el terminal positivo de la fuente de tensión del colector.

Resumiendo lo que sucede, se tiene lo siguiente: en la Figura 6-5, V_{BB} polariza directamente el diodo emisor, obligando a los electrones libres del emisor a entrar en la base. La estrecha y apenas dopada base hace que casi todos ellos tengan el tiempo suficiente para difundirse en el colector. Estos electrones circulan a través del colector, a través de R_C y hacia el terminal positivo de la fuente de tensión V_{CC} .

6-3. CORRIENTES EN UN TRANSISTOR

La Figura 6-6 muestra el símbolo de un transistor. Si se hace uso de la corriente convencional, se utiliza la Figura 6-6a; si se prefiere la corriente de electrones, se emplea la Figura 6-6b. En la Figura 6-6 hay tres corrientes distintas en el transistor: la corriente de emisor I_E , la corriente de base I_B y la corriente de colector I_C .

□ ¿Cómo se comportan las corrientes?

Como el emisor es la fuente de electrones, su corriente es la mayor de las tres. Casi todos los electrones del emisor circulan hacia el colector; por tanto, la corriente de colector es aproximadamente igual a la corriente de

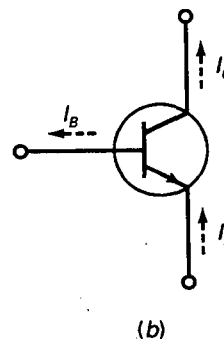
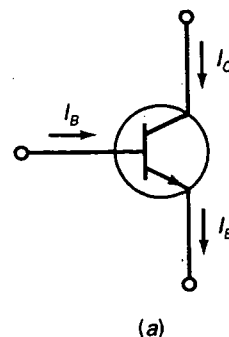


Figura 6-6. Tres corrientes del transistor. a) Flujo convencional; b) flujo de electrones.

emisor. La corriente de base es muy pequeña comparativamente, *a menudo menor que el 1 por 100 de la corriente del colector.*

□ Relación de corrientes

Recuérdese la ley de las corrientes de Kirchhoff. Establece que la suma de todas las corrientes que entran a un nudo o unión es igual a la suma de todas las corrientes que salen de ese nudo o unión. Al aplicarse a un transistor, la ley de Kirchhoff proporciona esta importante relación entre las tres corrientes del transistor:

$$I_E = I_C + I_B \quad (6-1)$$

Esta ecuación indica que la corriente de emisor es la suma de la corriente de colector y la corriente de base. Teniendo en cuenta que la corriente de base es mucho menor que la corriente de colector, es habitual hacer la siguiente aproximación: la corriente de colector es igual a la corriente de emisor:

$$I_C \approx I_E$$

Y la corriente de base es mucho más pequeña que la corriente de colector:

$$I_B \ll I_C$$

(Nota: \ll significa «mucho menor que».)

□ Alfa

La alfa de continua (simbolizada α_{dc}) se define como la corriente continua de colector dividida por la corriente continua de emisor.

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} \quad (6-2)$$

Como la corriente de colector es casi igual que la corriente de emisor, α_{dc} es ligeramente menor que 1. Por ejemplo, en un transistor de baja potencia, α_{dc} es mayor que 0,99. Incluso en un transistor de alta potencia, α_{dc} es típicamente mayor que 0,95.

□ Beta

La beta dc (simbolizada β_{dc}) de un transistor se define como la relación entre la corriente continua del colector y la corriente continua de la base:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \quad (6-3)$$

La **beta de continua** se conoce también como la *ganancia de corriente* porque una pequeña corriente de base produce una corriente mucho mayor de colector.

La ganancia de corriente es una gran ventaja de un transistor y ha llevado a todo tipo de aplicaciones. Para transistores de baja potencia (por debajo de 1 W), la ganancia de corriente es típicamente de 100 a 300. Los transistores de alta potencia (por encima de 1 W) normalmente tienen ganancias de corriente entre 20 y 100.

□ Dos derivaciones

La Ecuación (6-3) se puede despejar de dos formas equivalentes. La primera, cuando se conocen los valores de β_{dc} e I_B es posible calcular la corriente de colector mediante esta ecuación:

$$I_C = \beta_{dc} I_B \quad (6-4)$$

La segunda, cuando se conocen los valores de β_{dc} e I_C se puede calcular la corriente de base así:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{dc}} \quad (6-5)$$

EJEMPLO 6-1

Un transistor tiene una corriente de colector de 10 mA y una corriente de base de 40 μ A. ¿Cuál es la ganancia de corriente del transistor?

SOLUCION

Divida la corriente de colector entre la corriente de base para obtener:

$$\beta_{dc} = \frac{10 \text{ mA}}{40 \mu\text{A}} = 250$$

EJEMPLO 6-2

Un transistor tiene una ganancia de corriente de 175. Si la corriente de base es de 0.1 mA, ¿cuál es el valor de la corriente de colector?

SOLUCION

Multiplique la ganancia de corriente por la corriente de base para obtener:

$$I_C = 175(0.1 \text{ mA}) = 17.5 \text{ mA}$$

EJEMPLO 6-3

Un transistor tiene una corriente de colector de 2 mA. Si la ganancia de corriente es de 135, ¿cuál es el valor de la corriente de base?

SOLUCIÓN

Divida la corriente de colector entre la ganancia de corriente para obtener:

$$\beta_{dc} = \frac{2 \text{ mA}}{135} = 14.8 \mu\text{A}$$

6-4. LA CONEXIÓN EN EC

Existen tres formas útiles de conectar un transistor: en EC (emisor común), en CC (colector común), o en BC (base común). Las conexiones CC y BC se explican en capítulos posteriores. En este capítulo nos centraremos en la conexión EC porque es la más utilizada.

□ Emisor común

En la Figura 6-7a, el lado común o masa de cada fuente de tensión está conectado al emisor. Debido a esto, el circuito se conoce como configuración en emisor común (en EC). Obsérvese que el circuito tiene dos mallas. La malla de la izquierda es el circuito de base y la de la derecha es el circuito de colector.

En la malla de base, la fuente V_{BB} polariza en directa al diodo emisor con R_B como resistencia limitadora de corriente. Usando diferentes valores de V_{BB} o R_B se puede controlar la corriente de base. Como se verá más adelante, la corriente de base controla la corriente de colector, lo que significa que una pequeña corriente (base) gobierna una gran corriente (colector).

En el circuito del colector hay una fuente de tensión de valor V_{CC} que polariza en inversa al diodo colector a través de R_C . La fuente de tensión V_{CC} debe polarizar inversamente el diodo de colector o, de lo contrario, el transistor no funcionaría adecuadamente. Dicho de otra forma, el colector debe ser positivo en la Figura 6-7a para recolectar la mayoría de los electrones libres inyectados en la base.

En la Figura 6-7a, el flujo de corriente de base en la malla de la izquierda produce una tensión en la resistencia de base, R_B , con la polaridad mostrada. Similarmente, el flujo de corriente de colector en la malla de la derecha produce una tensión en la resistencia del colector, R_C , con la polaridad mostrada.

□ Subíndices dobles

En los circuitos de transistores se usa notación de doble subíndice. Cuando los subíndices son iguales, la tensión representa una fuente (V_{BB} y V_{CC}).

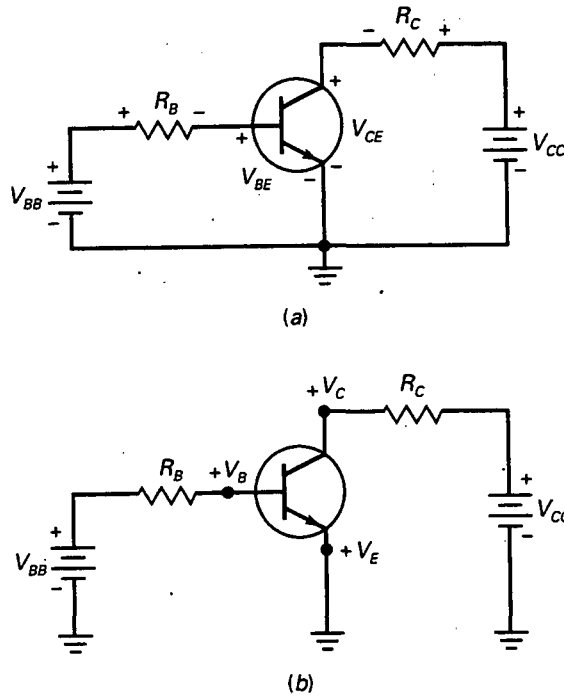


Figura 6-7. Conexión en EC. a) Circuito básico; b) circuito con masas.

Cuando los subíndices son diferentes representan las tensiones entre dos puntos (V_{BE} y V_{CE}).

Por ejemplo, los subíndices de V_{BB} son los mismos, lo que significa que V_{BB} es la fuente de tensión de la base. Similarmente, V_{CC} es la fuente de tensión de colector. Por otro lado, V_{BE} es la tensión entre los puntos B y E, entre la base y el emisor. De la misma manera, V_{CE} es la tensión entre los puntos C y E entre el colector y el emisor.

❑ Subíndices simples

Los subíndices simples se usan para las tensiones de los nodos, es decir, tensiones entre el punto del subíndice y masa. Por ejemplo, si redibujamos la Figura 6-7a con masas, obtenemos la Figura 6-7b. La tensión V_B es la tensión entre la base y masa, la tensión V_C es la tensión entre el colector y masa, y la tensión V_E es la tensión entre el emisor y masa. (En este circuito V_E es cero). Puede calcular una tensión con subíndice doble de distinto subíndice restando sus tensiones con subíndice simple. Aquí tenemos tres ejemplos:

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

$$V_{CB} = V_C - V_B$$

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

Así es como se calculan las tensiones de subíndice doble para cualquier circuito de transistor: como V_E es cero en una conexión EC (Fig. 6-7b), las tensiones se simplifican a:

$$V_{CE} = V_C$$

$$V_{CB} = V_C - V_B$$

$$V_{BE} = V_B$$

6-5. CURVA CARACTERÍSTICA DE ENTRADA

¿Qué aspecto se imagina el lector que tendrá la curva de I_B en función de V_{BE} ? Es como la curva de un diodo normal, como se ve en la Figura 6-8a. ¿Y por qué no? Estamos hablando acerca de la corriente de base y la tensión del diodo de emisor, por lo que cabría esperar una curva similar a la característica de corriente en función de la tensión de un diodo, lo que significa que podemos usar cualquiera de las tres aproximaciones de un diodo analizadas con anterioridad.

Aplicando la ley de Ohm a la resistencia de base de la Figura 6-7b, obtenemos esta derivación:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (6-6)$$

Si se utiliza un diodo ideal, $V_{BE} = 0$. Con la segunda aproximación, $V_{BE} = 0,7$ V, como se muestra en la Figura 6-8a.

La mayoría de las veces la segunda aproximación será el mejor compromiso entre la sencillez de cálculos al usar un diodo ideal y la precisión al usar aproximaciones superiores. Todo lo que se necesita recordar para la segunda aproximación es que $V_{BE} = 0,7$ V, como se muestra en la Figura 6-8a.

EJEMPLO 6-4

Use la segunda aproximación para calcular la corriente de base en la Figura 6-8b. ¿Cuál es la tensión a través de la resistencia de base? ¿Y la corriente de colector, si $\beta_{dc} = 200$?

SOLUCIÓN

La tensión de fuente de la base de 2 V polariza en directa al diodo emisor a través de una resistencia limitadora de corriente de 100 k Ω . Como el diodo emisor tiene una caída de 0,7 V, la tensión en la resistencia de base es

$$V_R = V_{BB} - V_{BE} = 2 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 1,3 \text{ V}$$

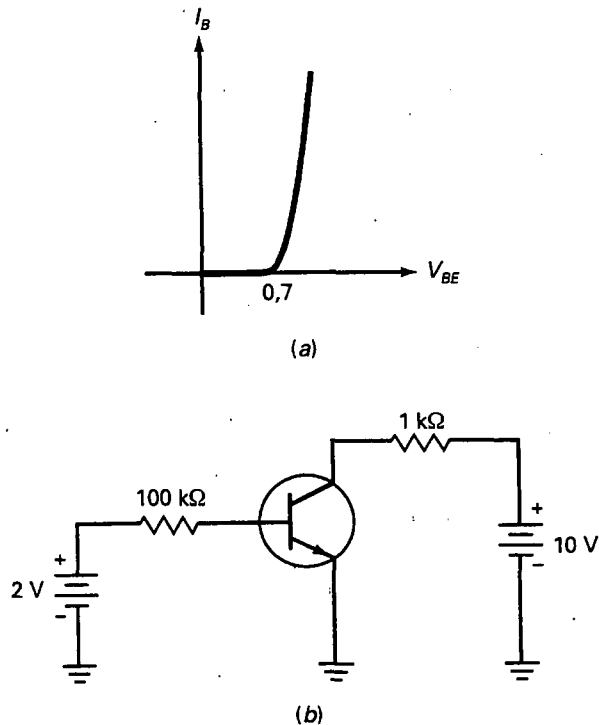


Figura 6-8. a) Curva del diodo; b) ejemplo.

La corriente a través de la resistencia de base vale:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{1.3 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 13 \text{ }\mu\text{A}$$

Con una ganancia de corriente de 200, la corriente de colector es:

$$I_C = \beta_{dc} I_B = (200)(13 \text{ }\mu\text{A}) = 2.6 \text{ mA}$$

6-6. CURVA CARACTERÍSTICA DE SALIDA

En la Figura 6-9a, ya sabemos cómo calcular la corriente de base. Como V_{BB} polariza en directa el diodo emisor, todo lo que necesitamos hacer es calcular la corriente a través de la resistencia de base R_B . Ahora, fijemos nuestra atención en la malla del colector.

En la Figura 6-9a se pueden variar V_{BB} y V_{CC} para establecer diferentes tensiones y corrientes en el transistor. Midiendo I_C y V_{CE} , se obtienen los datos para una curva de I_C , en función de V_{CE} . Por ejemplo, supóngase que se cambia V_{BB} para obtener $I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$. Entonces se puede variar V_{CC} , y medir los valores resultantes de I_C y V_{CE} . Trazando los datos, se dibuja la curva que

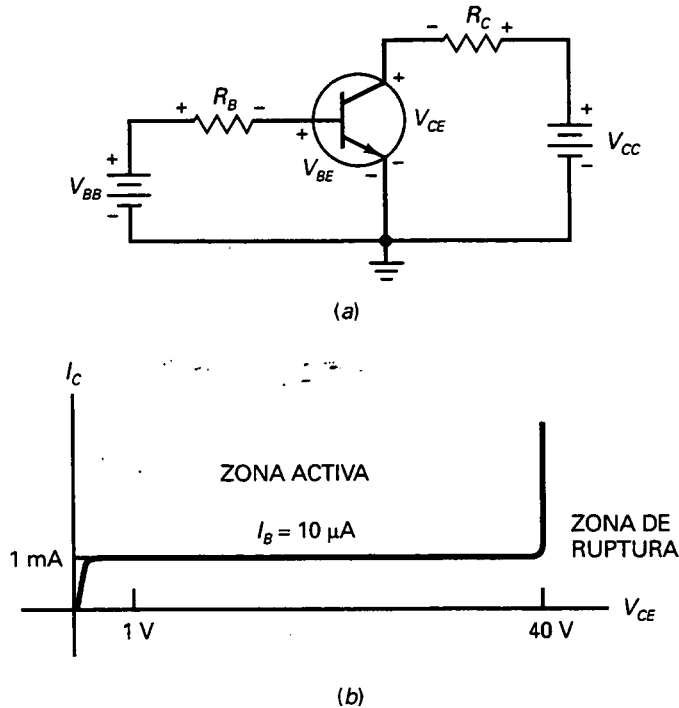


Figura 6-9. a) Circuito básico del transistor; b) curva de salida.

se muestra en la Figura 6-9b. (Nota: Esta curva es para un 2N3904, un transistor de baja potencia muy usado. Con otros transistores, los números pueden variar pero la forma de la curva es similar.)

Cuando V_{CE} es cero, el diodo de colector no tiene polarización inversa. Ésta es la razón por la que la curva muestra una corriente de colector cero. Cuando V_{CE} crece desde cero, la corriente de colector se eleva rápidamente en la Figura 6-9b. Cuando V_{CE} es de pocas decenas de voltios, la corriente de colector se hace *casi constante* e igual a 1 mA.

En la Figura 6-9b, la zona de corriente constante se relaciona con la anterior explicación sobre el funcionamiento del transistor. Después de que el diodo de colector se polariza en inversa, recoge todos los electrones que alcanzan la zona de deplexión. Incrementos mayores de V_{CE} no pueden aumentar la corriente del colector. ¿Por qué? Porque el colector sólo puede recoger aquellos electrones libres que el emisor inyecta en la base. El número de estos electrones inyectados depende sólo del circuito de base, no del circuito de colector. Por eso la Figura 6-9b muestra una zona constante en la corriente de colector entre V_{CE} menor de 1 V y una V_{CE} mayor de 40 V.

Si V_{CE} es superior a 40 V, el diodo de colector entra en la zona de ruptura y se pierde el funcionamiento normal del transistor. Éste no está diseñado para funcionar en la zona de ruptura. Por esta razón, una de las limitaciones que hay que buscar en las hojas de características del transistor es la tensión de ruptura de colector-emisor $V_{CE(máx)}$. Si el transistor entra en la zona de ruptura, se destruirá.

□ Tensión y potencia de colector

La ley de Kirchhoff señala que la suma de todas las tensiones a lo largo de una malla o trayectoria cerrada es igual a cero. Si se aplica al circuito del colector de la Figura 6-9a, la ley de las tensiones de Kirchhoff nos da esta importante ecuación:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (6-7)$$

Esta ecuación indica que la tensión colector-emisor es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector (V_{CC}) menos la tensión que hay en la resistencia de colector.

En la Figura 6-9a, el transistor presenta una disipación de potencia aproximada de

$$P_D = V_{CE} I_C \quad (6-8)$$

Esta ecuación dice que la potencia disipada por el transistor es igual a la tensión colector-emisor multiplicada por la corriente de colector. Es esta potencia la que hace que aumente la temperatura de la unión del diodo de colector. Cuanto mayor sea la potencia mayor será la temperatura de la unión.

El transistor se quemará si la temperatura de la unión llega a valores comprendidos entre 150 y 200 °C. Una de las informaciones más importantes que aparece en las hojas de características es la potencia máxima $P_{D(\text{máx})}$. El consumo de potencia dado por la Ecuación (6-8) debe ser menor que $P_{D(\text{máx})}$ para evitar que se destruya el transistor.

□ Zonas de funcionamiento

La curva de la Figura 6-9b exhibe diferentes zonas, en cada una de las cuales el funcionamiento del transistor es diferente. Primero tenemos la zona central, en la que el valor de V_{CE} puede estar entre 1 y 40 V, aproximadamente. Ésta es la zona más importante, ya que representa el funcionamiento normal del transistor. En ella el diodo de emisor está polarizado en directa y el diodo de colector tiene polarización inversa. Además, el colector se encuentra recogiendo casi todos los electrones que el emisor ha enviado a la base. Por ello, los cambios en la tensión de colector no tienen efecto sobre la corriente de colector. A esta zona se le da el nombre de *zona activa*. Gráficamente, la zona activa es la parte horizontal de la curva. En otras palabras, la corriente de colector es constante en esta zona.

Otra de las zonas de funcionamiento es la *zona de ruptura*. El transistor nunca debe funcionar en ella, ya que en tal caso sería altamente probable su destrucción o bien su degradación. A diferencia del diodo zener, que está adaptado para la zona de ruptura, un transistor no está diseñado para funcionar en dicha zona.

Finalmente, tenemos la parte ascendente de la curva, donde V_{CE} está comprendida entre cero y unas pocas decenas de voltio. Esta parte inclinada de la curva se llama *zona de saturación*. En esta zona, el diodo de colector tiene insuficiente tensión positiva para recoger todos los electrones libres

inyectados en la base. En la misma, la corriente de base, I_B , es mayor de lo normal, y la ganancia de corriente β_{dc} es menor de lo normal.

□ Más curvas

Si se miden I_C y V_{CE} para $I_B = 20 \mu A$, se puede trazar la segunda curva de la Figura 6-10. Esta curva es similar a la primera, excepto que la corriente de colector es de 2 mA en la zona activa. De nuevo, la corriente de colector es prácticamente constante en la zona activa.

Cuando se trazan varias curvas sobre los mismos ejes para diferentes corrientes de base, se obtiene una familia de curvas de colector como las de la Figura 6-10. Otra forma de obtener esta familia de curvas es utilizar un trazador de curvas (instrumento de prueba que muestra I_C en función de V_{CE} para un transistor). En la zona activa de la Figura 6-10, cada corriente de colector es 100 veces mayor que la corriente de base que le corresponde. Por ejemplo, la curva superior tiene una corriente de colector de 7 mA y una corriente de base de 70 μA , lo que representa una ganancia de corriente igual a:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{7 \text{ mA}}{70 \mu A} = 100$$

Si se verifica cualquier otra curva se obtiene aproximadamente el mismo resultado: una ganancia de corriente igual a 100.

Con otros transistores, la ganancia de corriente puede ser diferente de 100, pero la forma de las curvas es la misma. Todos los transistores tienen una zona activa, una zona de saturación y una zona de ruptura. La zona activa es la más importante, ya que la amplificación de señales es posible en la zona activa.

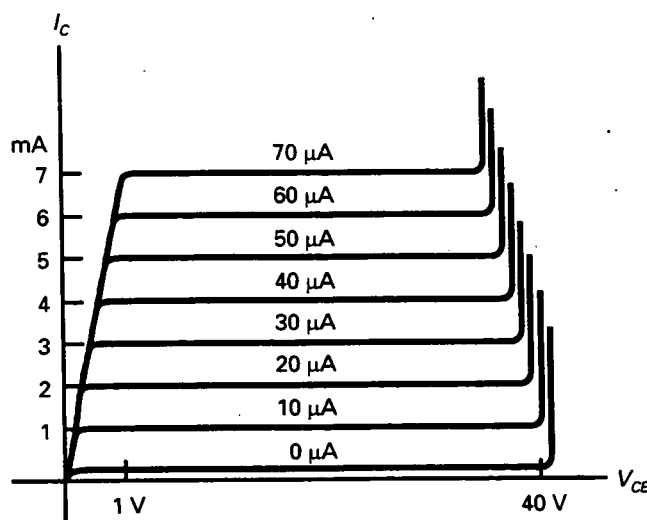


Figura 6-10. Conjunto de curvas de salida.

□ Zona de corte

La Figura 6-10 tiene una curva no esperada que se halla en la parte inferior. Ésta representa una cuarta posible zona de funcionamiento. Obsérvese que la corriente de base es cero, aunque todavía hay cierta corriente de colector. En un trazador de curvas, esta corriente, por lo general, es tan pequeña que no se ve. La curva inferior se ha exagerado dibujándola mayor de lo que es en realidad. Esta curva inferior recibe el nombre de *zona de corte* del transistor, y la pequeña corriente de colector es la *corriente de corte de colector*.

¿Por qué existe la corriente de corte de colector si no hay corriente en la base? Porque el diodo colector, como cualquier otro diodo, tiene una corriente inversa de portadores minoritarios y una corriente de fugas superficial. La corriente de corte de colector se puede ignorar si la corriente de colector es mucho mayor. Por ejemplo, un 2N3904 tiene una corriente de corte de colector de 50 nA. Si la corriente de colector real es igual a 1 mA, ignorar una corriente de corte de colector de 50 nA produce un error de cálculo menor del 5 por 100.

□ Repaso

Hemos visto cuatro zonas de funcionamiento en el transistor: *la activa*, *la de corte*, *la de saturación* y *la de ruptura*. Los transistores funcionan en la zona activa cuando se utilizan como amplificadores, que son circuitos que amplifican señales débiles. A veces se les da el nombre de *circuitos lineales* porque los cambios en la señal de entrada producen cambios proporcionales en la señal de salida. Las zonas de corte y saturación son útiles en los circuitos digitales y en otros circuitos para ordenadores, denominados *circuitos de conmutación*.

EJEMPLO 6-5

El transistor de la Figura 6-11a tiene $\beta_{dc} = 300$. Calcule I_B , I_C , V_{CE} y P_D .

SOLUCIÓN

La Figura 6-11b muestra el mismo circuito con masas. La corriente de base es igual a:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega} = 9.3 \mu\text{A}$$

La corriente de colector es:

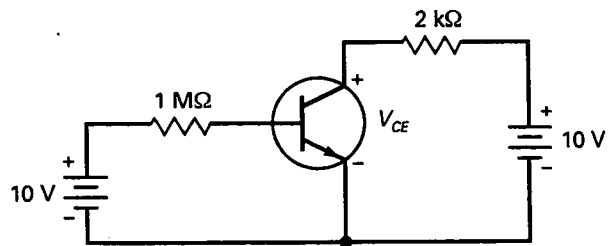
$$I_C = \beta_{dc} I_B = (300)(9.3 \mu\text{A}) = 2.79 \text{ mA}$$

Y la tensión colector-emisor vale:

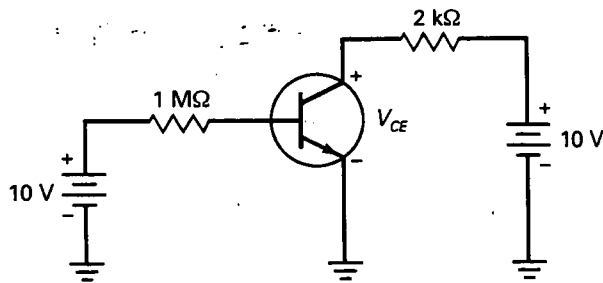
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10 \text{ V} - (2.79 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 4.42 \text{ V}$$

La potencia disipada en el colector es:

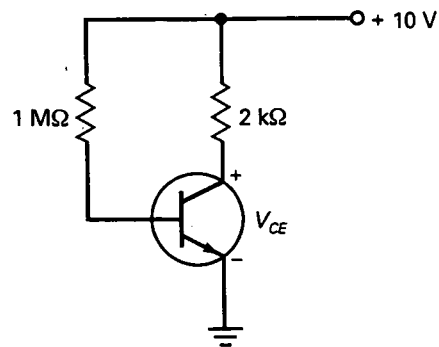
$$P_D = V_{CE} I_C = (4.42 \text{ V})(2.79 \text{ mA}) = 12.3 \text{ mW}$$



(a)



(b)



(c)

Figura 6-11. Circuito del transistor. a) Diagrama esquemático básico; b) circuito con masas; c) diagrama esquemático simplificado.

Cuando la fuente de tensión del colector y de la base son iguales, como en la Figura 6-11b, normalmente se verá el circuito dibujado en la forma simplificada de la Figura 6-11c.

EJEMPLO 6-6

La Figura 6-12 muestra un circuito de transistor diseñado en un ordenador con el programa *Electronics Workbench* (EWB). Calcule la ganancia de corriente del 2N4424.

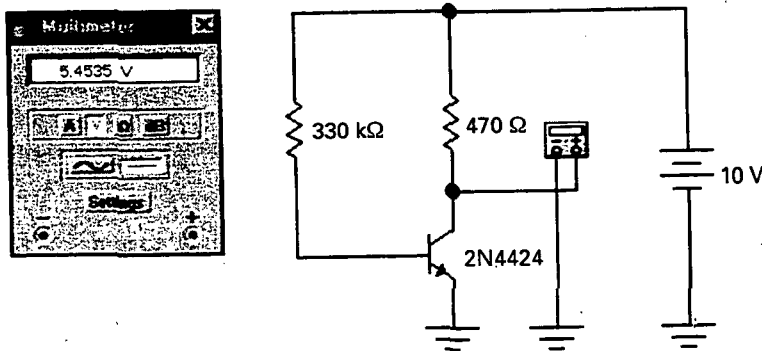


Figura 6-12. Circuito del EWB para calcular la ganancia de corriente en el 2N4424.

SOLUCIÓN

Primero, se obtiene la ganancia de corriente como sigue:

$$I_B = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{330 \text{ k}\Omega} = 28,2 \text{ }\mu\text{A}$$

Después, se necesita la corriente de colector. Como el polímetro indica una tensión colector-emisor de 5,45 V (redondeada a 3 cifras), la tensión a través de la resistencia del colector es:

$$V = 10 \text{ V} - 5,45 \text{ V} = 4,55 \text{ V}$$

Como la corriente de colector fluye hacia la resistencia de colector, podemos utilizar la ley de Ohm para obtener la corriente de colector:

$$I_C = \frac{4,55 \text{ V}}{470 \text{ }\Omega} = 9,68 \text{ mA}$$

Ahora, podemos calcular la ganancia de corriente:

$$\beta_{dc} = \frac{9,68 \text{ mA}}{28,2 \text{ }\mu\text{A}} = 343$$

El 2N4424 es un ejemplo de transistor con una alta ganancia de corriente. El margen típico de β_{dc} para transistores de pequeña señal es de 100 a 300.

6-7. APROXIMACIONES DE LOS TRANSISTORES

La Figura 6-13a muestra un transistor. Aparece una tensión V_{BB} a través del diodo emisor, y una tensión V_{CE} a través de los terminales colector-emisor. ¿Cuál es el circuito equivalente para este transistor?

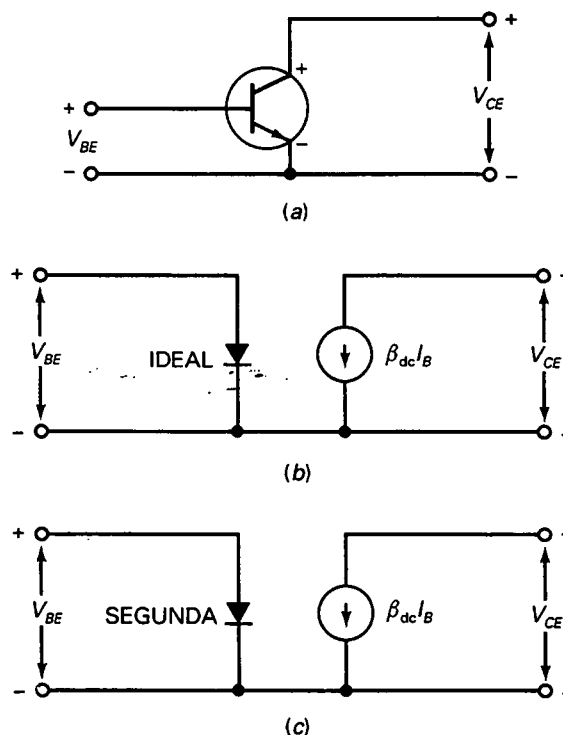


Figura 6-13.
Aproximaciones de los
transistores. a) Dispositivo
original; b) aproximación
ideal; c) segunda
aproximación.

□ Aproximación ideal

La Figura 6-13b muestra la aproximación ideal de un transistor. Nos imaginamos el diodo emisor como un diodo ideal. En este caso, V_{BE} es igual a cero. Esto nos permite calcular la corriente de base fácil y rápidamente. Este circuito equivalente es a menudo útil para detección de averías, cuando lo único que necesitamos es una aproximación estimada de la corriente de base. Como se muestra en la Figura 6-13b, el lado de colector del transistor actúa como una fuente de corriente que bombea una corriente de colector de $\beta_{dc} I_B$ a través de la resistencia de colector. Por tanto, después de calcular la corriente de base, se puede multiplicar por la ganancia de corriente para obtener la corriente de colector.

□ La segunda aproximación

La Figura 6-13c muestra la segunda aproximación de un transistor. Ésta se usa más habitualmente porque puede mejorar el análisis significativamente cuando la tensión de la fuente de base es pequeña.

Esta vez usamos la segunda aproximación de un diodo para calcular la corriente de base. Para transistores de silicio, esto significa que $V_{BE} = 0,7$ V. (Para transistores de germanio, $V_{BE} = 0,3$ V.) Con la segunda aproximación, las corrientes de base y de colector serán ligeramente menores que los valores ideales.

□ Aproximaciones superiores

La resistencia interna del diodo emisor se hace importante sólo en aplicaciones de alta potencia, para las que la corriente es grande. El efecto de la resistencia interna en el diodo emisor consiste en incrementar V_{BE} a más de 0,7 V.

Por ejemplo, en algunos circuitos de alta potencia, la V_{BE} a través del diodo base-emisor puede ser mayor de 1 V. Similarmente, la resistencia interna del diodo de colector puede tener un efecto notable en algunos diseños.

Además de las resistencias internas de emisor y colector, un transistor tiene muchos otros efectos de orden superior que hacen muy tediosos y laboriosos los cálculos manuales. Por esta razón, los cálculos por encima de la segunda aproximación se deberían realizar con ordenadores.

EJEMPLO 6-7

¿Cuál es la tensión colector-emisor en la Figura 6-14? Use el transistor ideal.

SOLUCIÓN

Tener un diodo emisor ideal significa que:

$$V_{BE} = 0$$

Por tanto, la tensión total entre los extremos de R_B es de 15 V. Según la ley de Ohm, la corriente de base es:

$$I_B = \frac{15 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} \approx 31,9 \text{ }\mu\text{A}$$

Ahora podemos calcular la corriente de colector, es igual a la ganancia de corriente multiplicada por la corriente de base:

$$I_C = 100(31,9 \text{ }\mu\text{A}) \approx 3,19 \text{ mA}$$

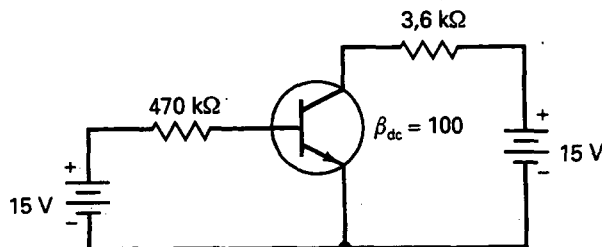


Figura 6-14. Ejemplo.

A continuación, calculamos la tensión colector-emisor, la cual es igual a la tensión de la fuente de colector menos la caída de tensión en la resistencia de colector:

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3.19 \text{ mA})(3.6 \text{ k}\Omega) = 3.52 \text{ V}$$

En un circuito como el de la Figura 6-14, la corriente de emisor no es importante, por lo que la mayoría de los ingenieros no calcularía ese valor. Pero como este es un ejemplo, si calculáremos la corriente de emisor. Esta es igual a la suma de la corriente de colector y la corriente de base:

$$I_E = 3.19 \text{ mA} + 31.9 \mu\text{A} = 3.22 \text{ mA}$$

Este valor es muy cercano al valor de la corriente de colector; ésta es otra razón para no molestarse en calcularla. La mayoría de las personas dirían que la corriente de emisor es aproximadamente 3.19 mA, el valor de la corriente de colector.

EJEMPLO 6-8

¿Cuál es la tensión colector-emisor en la Figura 6-14 si se usa la segunda aproximación?

SOLUCIÓN

En la Figura 6-14 las corrientes y las tensiones se calculan como sigue, si se usa la segunda aproximación. La tensión en el diodo emisor es:

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

Por tanto, la tensión total en R_B es de 14.3 V, que es la diferencia entre 15 y 0.7 V. La corriente de base vale:

$$I_B = \frac{14.3 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 30.4 \mu\text{A}$$

Ahora ya podemos calcular la corriente de colector. Es igual a la ganancia de corriente multiplicada por la corriente de base:

$$I_C = 100(30.4 \mu\text{A}) = 3.04 \text{ mA}$$

A continuación, calculamos la tensión colector-emisor. Es igual a la tensión de la fuente de colector menos la caída de tensión en la resistencia de colector:

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3.04 \text{ mA})(3.6 \text{ k}\Omega) = 4.06 \text{ V}$$

La mejora obtenida en esta respuesta con relación a la obtenida usando el transistor ideal es aproximadamente de medio voltio: 4.06 contra 3.52 V. ¿Es importante esta mitad de un voltio? Depende de si se están detectando averías, haciendo diseños, etc.

EJEMPLO 6-9

Suponga que mide 1 V para la V_{BE} . ¿Cuál es la tensión colector-emisor en la Figura 6-14?

SOLUCIÓN

La tensión total en R_B es 14 V, o sea, la diferencia de 15 y 1 V. Según la ley de Ohm, la corriente de base es:

$$I_B = \frac{14 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 29,8 \text{ }\mu\text{A}$$

Ahora podemos calcular la corriente de colector. Es igual a la ganancia de corriente multiplicada por la corriente de base:

$$I_C = 100(29,8 \text{ }\mu\text{A}) = 2,98 \text{ mA}$$

La tensión colector-emisor es igual a la tensión de la fuente de colector menos la caída de tensión en la resistencia de colector:

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (2,98 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 4,27 \text{ V}$$

EJEMPLO 6-10

¿Cuál es la tensión colector-emisor en los tres ejemplos anteriores cuando la tensión de la fuente de base es de 5 V?

SOLUCIÓN

Con el diodo ideal:

$$I_B = \frac{5 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 10,6 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100(10,6 \text{ }\mu\text{A}) = 1,06 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (1,06 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 11,2 \text{ V}$$

Con la segunda aproximación:

$$I_B = \frac{4,3 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 9,15 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100(9,15 \text{ }\mu\text{A}) = 0,915 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (0,915 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 11,7 \text{ V}$$

Con la medida de V_{BE} :

$$I_B = \frac{4 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 8,51 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100(8,51 \text{ }\mu\text{A}) = 0,851 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (0,851 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 11,9 \text{ V}$$

Este ejemplo permite comparar las tres aproximaciones en el caso de que la tensión de la fuente de base sea pequeña. Como se puede apreciar, todas las respuestas difieren entre sí como máximo en 1 V. Esta es la primera pista que ayuda a determinar qué aproximación emplear. Si se van a detectar fallos en este circuito, probablemente sea adecuado el análisis con el transistor ideal. Pero si se va a diseñar el circuito, podría querer usar una simulación de ordenador por su precisión.

6-8. CÓMO LEER LA HOJA DE CARACTERÍSTICAS

Los *transistores de pequeña señal* pueden disipar un vatio o menos; los transistores de potencia pueden disipar más de un vatio. Cuando se estudia la hoja de características para cualquiera de estos dos tipos de transistor, se debe comenzar por las limitaciones máximas, ya que son los límites para las corrientes, tensiones y otros valores del transistor.

□ Limitaciones en la zona de ruptura

En el Apéndice se dan los siguientes límites máximos para un 2N3904:

V_{CB}	60 V
V_{CEO}	40 V
V_{EB}	6 V

Estas limitaciones de tensión son tensiones inversas de ruptura y V_{CB} señala la máxima tensión inversa entre el colector y la base. La segunda limitación es V_{CEO} , que representa la tensión de colector-emisor con la base abierta. V_{EB} es la máxima tensión inversa del emisor a la base. Como ya se sabe, un diseño correcto nunca permite que las tensiones se acerquen a las limitaciones máximas precedentes. Si se recuerda lo dicho antes, basta con acercarse a las limitaciones máximas para acortar la vida de algunos dispositivos.

□ Corriente y potencia máximas

También se muestran como límites máximos estos valores:

I_C	200 mA dc	
P_D	625 mW	(para $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)
P_D	1,5 W	(para $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Aquí, I_C es la corriente máxima de colector. Esto significa que un 2N3904 puede controlar hasta 200 mA de corriente directa, asumiendo que no se excede la limitación de potencia.

Las siguientes dos limitaciones se refieren a P_D , la máxima limitación de potencia del dispositivo. Como puede observar, la primera limitación de potencia de 625 mW es menor que la otra limitación de potencia de 1,5 W. Cuál usar depende de si se va a hacer el intento de mantener frío el transistor. Si el transistor no se está refrigerando y no tiene un disipador de calor (que se expone más adelante), la temperatura de la cápsula T_C será mucho mayor que la temperatura ambiente T_A .

En la mayoría de las aplicaciones, un transistor de pequeña señal como el 2N3904 no está refrigerado y no tiene un radiador de calor. En este caso, el 2N3904 tiene una limitación de potencia de 625 mW cuando la temperatura ambiente es 25 °C.

La temperatura T_C es la temperatura de la cápsula que contiene el transistor. En la mayoría de las aplicaciones, la temperatura de la cápsula será mayor que 25 °C porque el calor interno del transistor aumenta la temperatura del encapsulado.

La única forma de mantener la temperatura de la cápsula a 25 °C cuando la temperatura ambiente es 25 °C es refrigerando con un ventilador o utilizando un gran disipador de calor. Si se utiliza una de estas técnicas se puede reducir la temperatura de la cápsula del transistor a 25 °C. Para estas condiciones la limitación de potencia es de 1,5 W.

❑ Factores de ajuste

Como se dijo en el Capítulo 5, el factor de ajuste indica cuánto hay que reducir la potencia máxima que puede disipar un dispositivo. El factor de ajuste del 2N3904 está dado como 5 mW/°C. Esto significa que hay que reducir el límite máximo de potencia de 625 mW en 5 mW por cada grado centígrado por encima de los 25 °C.

❑ Disipadores de calor

Una manera de aumentar la potencia máxima que puede disipar un transistor consiste en deshacerse con mayor rapidez del calor interno. Éste es el propósito de un *disipador de calor* (una masa de metal). Si se aumenta el área superficial de encapsulado del transistor, se permite que el calor se escape fácilmente hacia el aire circundante. Por ejemplo, la Figura 6-15a muestra un tipo de disipador de calor. Cuando éste se acopla al encapsulado de un transistor, el calor se emite más rápidamente debido al aumento en el área superficial suministrado por las aletas.

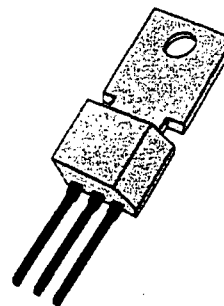
La Figura 6-15b muestra otro tipo de encapsulado. Se trata de un transistor de potencia con lengüeta. Una lengüeta metálica proporciona una trayectoria de salida para el calor del transistor. Esta lengüeta metálica se puede sujetar al chasis del equipo electrónico. Como el chasis es un disipador masivo de calor, éste puede escapar fácilmente del transistor al chasis.

Los grandes transistores de potencia, como el de la Figura 6-15c, tienen el colector conectado directamente a la cápsula para dejar que el calor esca-

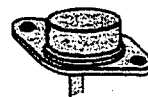


(a)

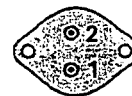
LENGÜETA METÁLICA



(b)



COLECTOR
CONECTADO
A LA CÁPSULA



PIN 1. BASE
PIN 2. EMISOR, CÁPSULA.
COLECTOR

(c)

Figura 6-15. a) Disipador de calor ajustable. b) Transistor de potencia con disipador. c) Transistor de potencia con el colector conectado a la cápsula.

pe tan fácilmente como sea posible. La cápsula del transistor se sujeta al chasis. Para evitar que el colector se ponga en cortocircuito con la masa del chasis, se coloca una pequeña lámina de mica entre el encapsulado del transistor y el chasis. En todo este proceso la idea fundamental es que el calor abandone el transistor con la mayor rapidez, lo que implica que el transistor es capaz de disipar una mayor potencia a la misma temperatura ambiente. A veces, se sujeta a un gran disipador de calor con aletas, lo cual es todavía más efectivo para eliminar el calor del transistor.

Sin importar la clase de disipador de calor que se emplee, el objetivo es reducir la temperatura del encapsulado, ya que tal logro hará que descienda la temperatura interna del transistor. La hoja de características incluye otras magnitudes llamadas resistencias térmicas. Éstas le permiten al diseñador calcular la temperatura del encapsulado para diferentes disipadores de calor.

□ Ganancia de corriente

Para analizar el transistor también se utilizan otro tipo de parámetros, llamados «parámetros h»; se usa h_{FE} en vez de β_{dc} como símbolo para la ganancia de corriente. Las dos cantidades son prácticamente iguales:

$$\beta_{dc} = h_{FE} \quad (6-9)$$

No se debe olvidar esta relación, porque las hojas de características usan el símbolo h_{FE} para designar la ganancia de corriente.

En la sección titulada «Características en conducción», la hoja de características de un 2N3904 presenta los valores de h_{FE} como sigue:

I_C (mA)	Mín h_{FE}	Máx h_{FE}
0,1	40	—
1	70	—
10	100	300
50	60	—
100	30	—

El 2N3904 trabaja mejor cuando la corriente de colector se halla cercana a los 10 mA. A este valor de corriente, la ganancia mínima de corriente es de 100 y la ganancia máxima de corriente es de 300. Este dato significa que, si se fabrica en serie un circuito que utilice transistores 2N3904 y una corriente de colector de 10 mA, entonces algunos transistores tendrán una ganancia de corriente apenas de 100 y otros lograrán una ganancia de corriente de hasta 300. La mayor parte de los transistores tendrán una ganancia de corriente situada en la parte central de este intervalo.

Obsérvese que la ganancia mínima de corriente disminuye en corrientes de colector que sean menores que o mayores que 10 mA. A 0,1 mA, la ganancia mínima de corriente es 40. A 100 mA, la ganancia mínima de corriente es 30. La hoja de características contiene solamente la ganancia mínima de corriente para corrientes distintas de 10 mA, ya que los valores mínimos representan el peor de los casos. Los diseñadores hacen en general un circuito para el peor de los casos, o sea, que tratan de imaginarse cómo funcionará

un circuito cuando ciertas características del transistor, como la ganancia de corriente, adquieran valores correspondientes al peor caso posible.

EJEMPLO 6-11

Un 2N3904 tiene $V_{CE} = 10 \text{ V}$ e $I_C = 20 \text{ mA}$. ¿Qué potencia disipa? ¿Qué seguridad ofrece este nivel de disipación de potencia si la temperatura ambiente es de 25°C ?

SOLUCIÓN

Multiplique V_{CE} por I_C para obtener

$$P_D = (10 \text{ V})(20 \text{ mA}) = 200 \text{ mW}$$

¿Es esto seguro? Si la temperatura ambiente es de 25°C , el límite máximo de potencia del transistor es de 625 mW , lo que quiere decir que el transistor está funcionando dentro de su límite de potencia.

Como ya debe saber el lector, un diseño incluye un factor de seguridad que garantiza una vida larga de funcionamiento del transistor. Son comunes los factores de seguridad de 2 o más. Un factor de seguridad de 2 significa que el diseñador permitirá una disipación de potencia de hasta la mitad de 625 mW , es decir, 312 mW . Por tanto, una potencia sólo de 200 mW es muy segura, suponiendo que la temperatura se mantenga en 25°C .

EJEMPLO 6-12

¿Qué seguridad ofrece el nivel de disipación de potencia si la temperatura ambiente es de 100°C en el Ejemplo 6-11?

SOLUCIÓN

En primer lugar, calcule el número de grados en que la nueva temperatura ambiente supera a la temperatura de referencia de 25°C . Haga lo siguiente:

$$100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$$

A veces encontrará esto escrito como

$$\Delta T = 75^\circ\text{C}$$

donde Δ significa «incremento de». Lea la ecuación como «el incremento de temperatura es de 75°C ».

Ahora, multiplique el factor de ajuste por el incremento de temperatura para obtener

$$(5 \text{ mW}^\circ\text{C})(75^\circ\text{C}) = 375 \text{ mW}$$



6-9. DETECCIÓN DE AVERÍAS

La Figura 6-16 muestra un circuito en emisor común con masas. La fuente de polarización de base de 15 V polariza directamente el diodo de emisor mediante una resistencia de $470 \text{ k}\Omega$. La fuente de polarización de colector de 15 V polariza inversamente el diodo de colector mediante una resistencia de $1 \text{ k}\Omega$. Se utilizará la aproximación ideal para calcular la tensión colector-emisor. Los cálculos son los siguientes:

$$I_B = \frac{15 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 31,9 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = 100(31,9 \text{ }\mu\text{A}) = 3,19 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3,19 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 11,8 \text{ V}$$

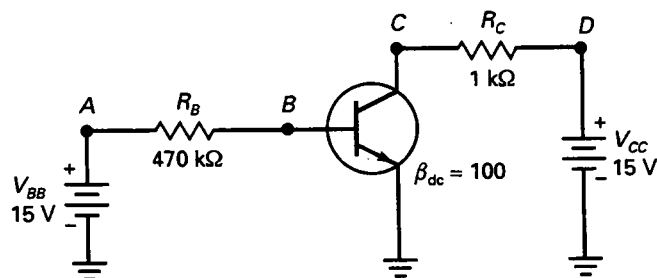


Figura 6-16. Detectando averías en un circuito.

❑ Fallos comunes

Si se van a detectar fallos en un circuito como el de la Figura 6-16, uno de los primeros valores que hay que medir es la tensión colector-emisor. Su valor debería ser aproximadamente de 11,8 V. ¿Por qué no usar la segunda o la tercera aproximación para lograr una respuesta más exacta? Porque las resistencias tienen comúnmente una tolerancia de por lo menos ± 5 por 100, lo que hace que la tensión colector-emisor difiera de los valores calculados, sin importar qué aproximación se use.

De hecho, cuando aparecen averías en general se trata de grandes averías, como cortocircuitos o circuitos abiertos. Los cortocircuitos pueden ocurrir como consecuencia de dispositivos dañados o gotas de soldadura entre las conexiones de los componentes. Los circuitos abiertos se producen cuando los componentes se queman. Fallos como éstos producen grandes cambios en las corrientes y las tensiones. Por ejemplo, uno de los problemas comunes es que no llegue tensión de la fuente al colector. Este problema podría aparecer de diferentes formas; por ejemplo, un fallo en la misma fuente de alimentación, una conexión abierta entre la fuente de alimentación y la resistencia de colector, una resistencia de colector en circuito abierto, etc. En cualquiera de esos casos, la tensión de colector de la Figura 6-16 será aproximadamente cero porque no hay tensión en la fuente de colector.

Otro fallo posible es una resistencia de base en circuito abierto, lo cual provoca que la corriente de base se haga cero. Esto obliga a la corriente de colector a caer a cero y a la tensión colector-emisor a elevarse a 15 V, o sea, al valor de la fuente de tensión de colector. Un transistor abierto produce el mismo efecto.

❑ Cómo piensan quienes detectan averías

La clave es ésta: los fallos típicos originan grandes desviaciones en las corrientes y las tensiones de un transistor. Quienes detectan averías rara vez buscan diferencias de décimas de voltio. Lo que buscan son tensiones que sean ostensiblemente distintas a los valores normales. Por ello, el transistor ideal es tan útil como punto de partida en la detección de fallos. Además, explica por qué muchos detectores de averías ni siquiera usan calculadoras para determinar la tensión colector-emisor.

Si no emplean sus calculadoras, ¿qué hacen entonces? Estiman mentalmente el valor de la tensión colector-emisor. He aquí cómo razona un detector de averías experto al calcular la tensión colector-emisor en la Figura 6-16:

La tensión de la resistencia de base es aproximadamente de 15 V. Una resistencia de base de 1 M Ω produciría una corriente de base aproximadamente igual a 15 μ A. Como 470 k Ω es la mitad de 1 M Ω , la corriente de base debe ser el doble, aproximadamente de 30 μ A. Una ganancia de corriente de 100 da una corriente de colector de 3 mA, más o menos. Cuando esta corriente circula en 1 k Ω , produce una caída de tensión de 3 V. Restando 3 V de 15 V, quedan 12 V entre los terminales colector-emisor. Por tanto, V_{CE} debería tener un valor alrededor de los 12 V; de lo contrario, algo funciona mal en este circuito.

❑ Tabla de fallos

Como se dijo en el Capítulo 5, un componente en cortocircuito equivale a una resistencia nula, y un componente abierto es equivalente a una resistencia infinita. Por ejemplo, la resistencia de base R_B puede estar abierta o en cortocircuito. Llamemos R_{BO} y R_{BS} a la resistencia en esas condiciones, respectivamente. De modo similar, la resistencia de colector puede estar abierta o en cortocircuito, simbolizada por R_{CO} y R_{CS} , respectivamente.

En la Tabla 6-1 se indican algunas averías que podrían producirse en un circuito como el de la Figura 6-16. Las tensiones se calcularon usando la segunda aproximación. Si el circuito funcionase normalmente se debería medir una tensión de colector de aproximadamente 12 V. Si la resistencia de base estuviese en cortocircuito, aparecerían +15 V en la base. Este valor tan elevado destruiría el diodo emisor. El diodo colector probablemente se abriría, obligando a la tensión de colector a elevarse a 15 V. En la Tabla 6-1 se muestra este fallo R_{BS} y sus tensiones.

Si la resistencia de base estuviera abierta, no habría tensión ni corriente en la base. Además, la corriente de colector sería cero, y la tensión de colector aumentaría a 15 V. En la Tabla 6-1 se muestra este fallo R_{BO} y sus tensiones. Continuando de esta forma, se puede completar la tabla. La Figura 6-16 se repite aquí como referencia.

Tabla 6-1. Fallos y síntomas

Fallo	V_B (V)	V_C (V)	Comentario
Ninguno	0,7	12	No hay problema
R_{BS}	15	15	Transistor destruido
R_{BO}	0	15	No hay corriente ni en la base ni en el colector
R_{CS}	0,7	15	
R_{CO}	0,7	0	
V_{BB} es cero	0	15	Verificar la fuente y su conexión
V_{CC} es cero	0,7	0	Verificar la fuente y su conexión

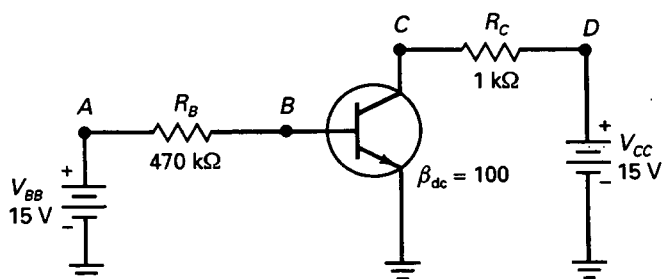


Figura 6-16. Detectando averías en un circuito.

RESUMEN

Sección 6-1. El transistor sin dopaje

En un transistor hay tres zonas de dopado: el emisor, la base y el colector. Entre la base y el emisor hay una unión pn ; a esta parte del transistor se le llama diodo emisor. Hay otra unión pn entre la base y el colector; esta parte del transistor se denomina diodo colector.

Sección 6-2. El transistor polarizado

En funcionamiento normal el diodo emisor tiene polarización directa y el diodo colector tiene polarización inversa. En estas condiciones, el emisor envía electrones libres a la base. La mayor parte de estos electrones libres pasan por la base hacia el colector. Por ello, la corriente de colector es aproximadamente igual a la corriente de emisor. La corriente de base es mucho más pequeña, generalmente menor que el 5 por 100 de la corriente de emisor.

Sección 6-3. Corrientes en un transistor

La relación entre la corriente de colector y la corriente de base se llama ganancia de corriente y se expresa con β_{dc} o h_{FE} . En transistores de baja potencia, el valor de la ganancia de corriente oscila entre 100 y 300. La corriente de emisor es la mayor de las tres corrientes, la corriente de colector es casi igual que la de emisor y la corriente de base es mucho más pequeña.

Sección 6-4. La conexión en EC

En un circuito en EC, el emisor es el terminal común y se lleva a masa. La unión base-emisor de un transistor se comporta aproximadamente como un diodo normal. La unión base-colector actúa como una fuente de corriente que es igual a β_{dc} multiplicada por la corriente de base. El transistor puede funcionar en la zona activa, una zona de saturación, una zona de corte y una zona de ruptura. La zona activa es la que se usa en los amplificadores lineales. La saturación y el corte se usan en los circuitos digitales.

Sección 6-5. Curva de entrada

La curva de la corriente de base en función de la tensión base-emisor se parece a la curva de un diodo normal. Por tanto, se puede usar cualquiera de las tres aproximaciones del diodo para calcular la corriente de base. La mayor parte de las veces sólo se necesitan la aproximación ideal y la segunda aproximación.

Sección 6-6. Curvas de salida

Las cuatro zonas distintas de funcionamiento de un transistor que se aprecian en la curva de salida son la zona activa, la zona de saturación, la zona de corte y la zona de ruptura. Cuando se usa como amplificador, el transistor funciona en la zona activa. Cuando se usa en circuitos digitales, el transistor normalmente funciona en la zona de saturación y de corte. Por lo general se evita la zona de ruptura, ya que en ella es muy alta la probabilidad de que se destruya el transistor.

Sección 6-7. Aproximaciones para el transistor

En la mayor parte del trabajo en electrónica, las respuestas exactas son solamente una pérdida de tiempo. Casi todos usan aproximaciones, ya que las respuestas así obtenidas son adecuadas en la mayoría de las aplicaciones. El transistor ideal es útil en la detección de fallos. La tercera aproximación se requiere para diseñar con precisión. La segunda aproximación es un buen compromiso entre la detección de fallos y el diseño.

Sección 6-8. Cómo leer la hoja de características

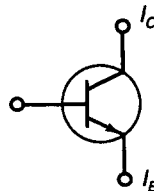
Los transistores tienen limitaciones máximas con respecto a sus tensiones, corrientes y potencias. Los transistores para pequeña señal pueden disipar un vatio o menos. Los transistores de potencia pueden disipar más de un vatio. La temperatura puede cambiar el valor de las características de un transistor. La potencia máxima disminuye a medida que aumenta la temperatura. Además, la ganancia de corriente experimenta grandes cambios con la temperatura.

Sección 6-9. Detección de averías

Cuando aparecen averías producen por lo general grandes cambios en las tensiones del transistor. Por esta razón, el análisis con el modelo ideal es adecuado para quienes están detectando averías. Además, muchos detectores de averías no usan sus calculadoras, ya que usarlas obstaculiza sus razonamientos. Los mejores detectores de averías aprenden a estimar mentalmente las tensiones que quieren medir.

DEFINICIONES

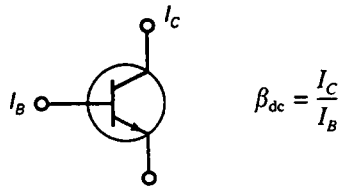
(6-2) Alfa de continua:



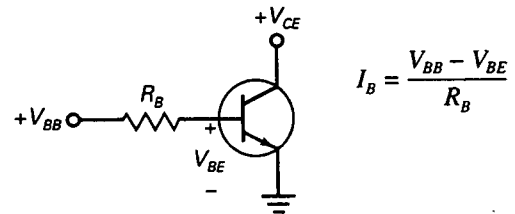
$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$

232 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

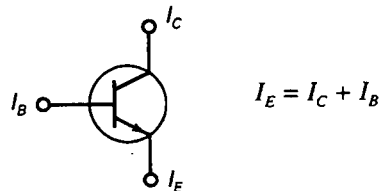
(6-3) Beta de continua (ganancia de corriente):



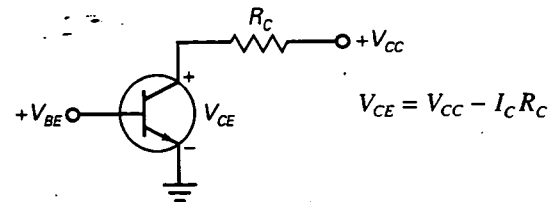
(6-6) Corriente de base:

**DERIVACIONES**

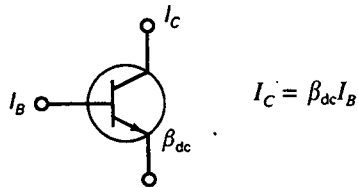
(6-1) Corriente de emisor:



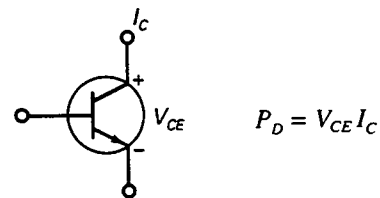
(6-7) Tensión colector-emisor:



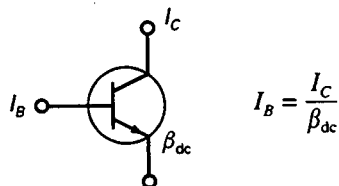
(6-4) Corriente de colector:



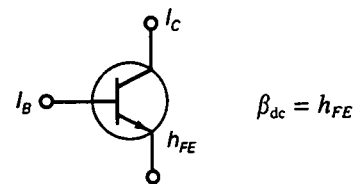
(6-8) Disipación de potencia colector-emisor:



(6-5) Corriente de base:



(6-9) Ganancia de corriente:

**EJERCICIOS PARA EL ALUMNO****CUESTIONES**

- ¿Cuántas zonas de dopaje tiene un transistor?
 - 1
 - 2
 - 3
 - 4
- ¿Cuál es una de las cosas más importantes que hace un transistor?
 - Amplifica señales débiles
 - Rectifica la tensión de red
 - Regula la tensión
 - Emite luz
- ¿Quién inventó el primer transistor de unión?
 - Bell
 - Faraday
 - Marconi
 - Schockley
- En un transistor *npn*, los portadores mayoritarios en la base son
 - Los electrones libres
 - Los huecos
 - Ninguno de los dos
 - Ambos

5. La barrera de potencial entre los extremos de cada zona de deplexión tiene un valor de
 - a) 0
 - b) 0,3 V
 - c) 0,7 V
 - d) 1 V
6. El diodo de emisor normalmente
 - a) Tiene polarización directa
 - b) Tiene polarización inversa
 - c) No conduce
 - d) Funciona en la zona de ruptura
7. En el funcionamiento normal del transistor, el diodo de colector debe
 - a) Tener polarización directa
 - b) Tener polarización inversa
 - c) No conducir
 - d) Funcionar en la zona de ruptura
8. La base de un transistor *npn* es estrecha y:
 - a) Fuertemente dopada
 - b) Ligeramente dopada
 - c) Metálica
 - d) Está dopada con un material pentavalente
9. La mayor parte de los electrones en la base de un transistor *npn* circulan
 - a) Saliendo de la conexión de la base
 - b) Entrando al colector
 - c) Entrando al emisor
 - d) Entrando a la fuente de tensión de la base
10. La mayor parte de los electrones en la base de un transistor *npn* no se recombinan porque
 - a) Tienen un tiempo de vida muy largo
 - b) Tienen carga negativa
 - c) Deben recorrer un gran trayecto a lo largo de la base
 - d) Circulan saliendo de la base
11. La mayor parte de los electrones que circulan a lo largo de la base
 - a) Circularán hacia el colector
 - b) Circularán saliendo de la conexión de la base
 - c) Se recombinarán con los huecos de la base
 - d) Se recombinarán con los huecos del colector
12. La ganancia de corriente de un transistor es la relación entre
 - a) La corriente de colector y la corriente de emisor
 - b) La corriente de colector y la corriente de base
 - c) La corriente de base y la corriente de colector
 - d) La corriente de emisor y la corriente de colector
13. Al aumentar la tensión de la fuente de polarización de colector aumentará
 - a) La corriente de base
 - b) La corriente de colector
 - c) La corriente de emisor
 - d) Ninguna de las anteriores
14. El hecho de que haya sólo unos cuantos huecos en la zona de la base significa que la base
 - a) Está ligeramente dopada
 - b) Está fuertemente dopada
 - c) No está dopada
 - d) Ninguna de las anteriores
15. En un transistor *npn* polarizado normalmente, los electrones en el emisor tienen la energía suficiente para sobrepasar la barrera de potencial de
 - a) La unión base-emisor
 - b) La unión base-colector
 - c) La unión colector-base
 - d) La trayectoria de recombinación
16. Cuando un electrón libre se recombina con un hueco en la zona de la base, el electrón libre se convierte en
 - a) Otro electrón libre
 - b) Un electrón de valencia
 - c) Un electrón de la banda de conducción
 - d) Un portador mayoritario
17. ¿Cuál es el aspecto más importante de la corriente de colector?
 - a) Se mide en miliamperios
 - b) Es igual a la corriente de base dividida entre la ganancia de corriente
 - c) Es pequeña
 - d) Es aproximadamente igual a la corriente de emisor
18. Si la ganancia de corriente es de 200 y la corriente de colector es de 100 mA, la corriente de base es igual a
 - a) 0,5 mA
 - b) 2 mA
 - c) 2 A
 - d) 20 A
19. La tensión base-emisor es normalmente
 - a) Menor que la tensión de la fuente de polarización de la base
 - b) Igual a la tensión de la fuente de polarización de la base
 - c) Mayor que la tensión de la fuente de polarización de la base
 - d) Nada se puede afirmar
20. La tensión colector-emisor normalmente es
 - a) Menor que la tensión de la fuente de polarización del colector
 - b) Igual a la tensión de la fuente de polarización del colector
 - c) Mayor que la tensión de la fuente de polarización del colector
 - d) Nada se puede afirmar
21. La potencia disipada por un transistor es aproximadamente igual a la corriente de colector multiplicada por
 - a) La tensión base-emisor
 - b) La tensión colector-emisor
 - c) La tensión de la fuente de la base
 - d) 0,7 V

234 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

22. Una pequeña corriente de colector que está presente cuando la corriente de base es cero proviene de la corriente de fugas de
 - a) El diodo de emisor
 - b) El diodo de colector
 - c) El diodo de base
 - d) El transistor
23. Un transistor polarizado en la zona activa se comporta como un diodo y
 - a) Una fuente de tensión
 - b) Una fuente de corriente
 - c) Una resistencia
 - d) Una fuente de alimentación
24. Si la corriente de base es de 100 mA y la ganancia de corriente es de 30, la corriente de colector vale
 - a) 300 mA
 - b) 3 A
 - c) 3,33 A
 - d) 10 A
25. La tensión base-emisor de un transistor ideal vale
 - a) 0
 - b) 0,3 V
 - c) 0,7 V
 - d) 1 V
26. Si se vuelve a calcular la tensión colector-emisor con la segunda aproximación, por lo general la respuesta es
 - a) Menor que el valor ideal
 - b) La misma que el valor ideal
 - c) Mayor que el valor ideal
 - d) Imprecisa
27. En la zona activa, la corriente de colector no se ve afectada significativamente por
 - a) La fuente de tensión de polarización de la base
 - b) La corriente de base
 - c) La ganancia de corriente
 - d) La resistencia de colector
28. La tensión base-emisor en la segunda aproximación vale
 - a) 0
 - b) 0,3 V
 - c) 0,7 V
 - d) 1 V
29. Si la resistencia de la base está abierta, ¿qué valor tiene la corriente de colector?
 - a) 0
 - b) 1 mA
 - c) 2 mA
 - d) 10 mA
3. Dibuje los dos circuitos equivalentes (ideal y segunda aproximación) para representar un transistor funcionando en su zona activa. Después dígame cuándo y cómo usaría esos circuitos para calcular las corrientes y tensiones del transistor.
4. Dibuje el circuito de un transistor con conexión en EC. ¿Qué tipo de problemas puede tener en un circuito como éste y qué medidas tomaría para aislar cada problema?
5. Cuando se mira un diagrama esquemático que muestra un transistor *nnp* y un *pnp*, ¿cómo puede identificar cada tipo? ¿Cómo puede identificar la dirección del flujo de electrones (o convencional)?
6. Nombre un instrumento de test que puede representar un conjunto de curvas de salida, I_C en función de V_{CE} , para un transistor.
7. ¿Cuál es la fórmula para la disipación de potencia de un transistor? Conociendo esta relación, ¿en qué lugar de la recta de carga se espera que la potencia disipada sea máxima?
8. ¿Cuáles son las tres corrientes de un transistor y cómo se relacionan?
9. Dibuje un transistor *nnp* y un *pnp*. Marque todas las corrientes y muestre las direcciones de flujo.
10. Los transistores se pueden conectar en cualquiera de las siguientes configuraciones: emisor común, colector común y base común. ¿Cuál es la configuración más usual?

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 6-3. Corrientes en un transistor

- 6-1. Un transistor tiene una corriente de emisor de 10 mA y una corriente de colector de 9,95 mA. ¿Cuál es la corriente de base?
- 6-2. La corriente de colector vale 5 mA y la corriente de base vale 0,02 mA. ¿Cuál es el valor de la ganancia de corriente?
- 6-3. Un transistor tiene una ganancia de corriente de 125 y una corriente de base igual a 30 mA. ¿Qué valor tiene la corriente de colector?
- 6-4. Si la corriente de colector es de 50 mA y la ganancia de corriente es de 65, ¿cuánto vale la corriente de base?

Sección 6-5. Curva de entrada

- 6-5. ¿Cuál es el valor de la corriente de base en la Figura 6-17?
- 6-6. Si la ganancia de corriente disminuye de 200 a 100 en la Figura 6-17, ¿cuánto vale la corriente de base?

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

1. Quiero que dibuje un transistor *nnp* mostrando las zonas *n* y *p*. Después quiero que polarice el transistor adecuadamente y me diga cómo funciona.
2. Dibuje un conjunto de curvas de salida. Después, usando esas curvas, muéstreme dónde están las cuatro zonas de un transistor.

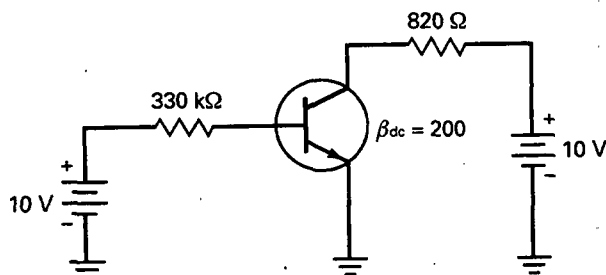


Figura 6-17

- 6-7. Si la resistencia de 330 kΩ en la Figura 6-17 tiene una tolerancia de ± 5 por 100, ¿cuál es el valor máximo de la corriente de base?

Sección 6-6. Curvas de salida

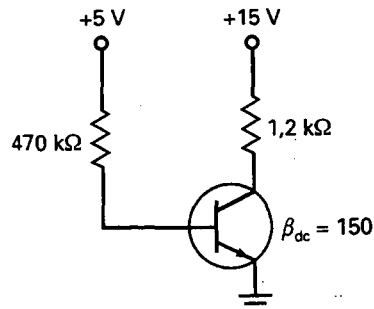
- 6-8. Un circuito de un transistor, similar al de la Figura 6-17, tiene una fuente de polarización de colector de valor 20 V, una resistencia de colector igual a 1,5 kΩ y una corriente de colector de 5 mA. ¿Cuál es el valor de la tensión colector-emisor?
- 6-9. Si en un transistor la corriente de colector es de 100 mA y la tensión colector-emisor es de 3,5 V, ¿qué potencia disipa?

Sección 6-7. Aproximaciones para el transistor

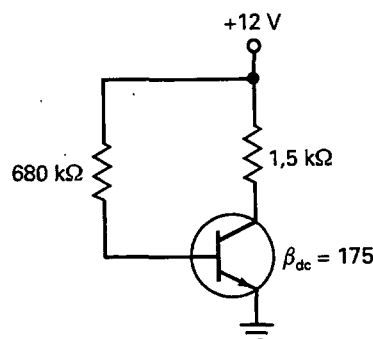
- 6-10. ¿Qué valores tienen la tensión colector-emisor y la potencia disipada en el transistor en la Figura 6-17? (Resuelva el problema usando la aproximación ideal y la segunda aproximación.)
- 6-11. En la Figura 6-18a se indica una forma más simple de dibujar un circuito de un transistor. Funciona igual que los circuitos ya estudiados. ¿Cuál es el valor de la tensión colector-emisor? ¿Y la potencia disipada en el transistor? (Resuelva el problema empleando la aproximación ideal y la segunda aproximación.)
- 6-12. Cuando las fuentes de polarización de base y de colector son iguales, el transistor se puede dibujar como se ve en la Figura 6-18b. ¿Cuál es la tensión colector-emisor en ese circuito? ¿Y la potencia en el transistor? (Resuelva el problema usando la aproximación ideal y la segunda aproximación.)

Sección 6-8. Cómo leer la hoja de características

- 6-13. ¿Cuál es el margen de temperatura de almacenamiento del 2N3904?



(a)



(b)

Figura 6-18

- 6-14. ¿Cuál es el valor máximo de h_{FE} para el 2N3903 si la corriente de colector es de 10 mA y la tensión colector-emisor es de 1 V?
- 6-15. Un transistor tiene un límite máximo de potencia de 1 W. Si la tensión colector-emisor es de 10 V y la corriente de colector es de 120 mA, ¿qué sucede con la limitación de potencia?
- 6-16. Un 2N3904 tiene una disipación de potencia de 150 mW sin disipador de calor. Si la temperatura ambiente es de 65 °C, ¿qué sucede con la limitación de potencia?

Sección 6-9. Detección de averías

- 6-17. En la Figura 6-17, la tensión colector-emisor, ¿aumenta, disminuye o mantiene el mismo valor para cada uno de estos fallos?
- 330 kΩ en cortocircuito
 - 330 kΩ abierta
 - 820 Ω en corto
 - 820 Ω abierta
 - No hay tensión en la fuente de polarización de la base
 - No hay tensión en la fuente de polarización del colector

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 6-18. ¿Cuál es el valor de α_{dc} de un transistor cuya ganancia de corriente es igual a 200?
- 6-19. ¿Qué ganancia de corriente tiene un transistor cuya α_{dc} vale 0,994?
- 6-20. Diseñe un circuito en EC que cumpla los requisitos siguientes: $V_{BB} = 5$ V, $V_{CC} = 15$ V, $h_{FE} = 120$, $I_C = 10$ mA y $V_{CE} = 7,5$ V.
- 6-21. Un 2N5067 es un transistor de potencia cuya r_b vale 10Ω . ¿Qué caída $I_B r_b$ se registra si $I_B = 1$ mA? ¿Si $I_B = 10$ mA? ¿Si $I_B = 50$ mA?
- 6-22. Un 2N3904 tiene un límite máximo de potencia de 350 mW a temperatura ambiente (25 °C). Si la tensión colector-emisor es de 10 V, ¿cuál es la corriente máxima que puede soportar el transistor si la temperatura ambiente es de 50 °C?
- 6-23. Suponga que se conecta un LED en serie con los 820Ω en la Figura 6-17. ¿Qué valor tiene la corriente en el LED?
- 6-24. ¿Qué valor tiene la tensión de saturación colector-emisor para un 2N3904 cuando la corriente de colector es de 100 mA? Emplee la curva inferior de la Figura 17 de la hoja de características.

ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES

Utilice la Figura 6-19 para resolver los siguientes problemas. Para la variable independiente considere

aumentos de aproximadamente el 10 por 100 y emplee la segunda aproximación del transistor. Su contestación deberá ser una N (no cambio) si el cambio en la variable dependiente es tan pequeño que sería difícil medirlo.

- 6-25. Trate de hallar la respuesta a cada una de las variables dependientes del cuadro titulado V_{BB} . Verifique sus contestaciones. Luego conteste la pregunta siguiente tan simple y directamente como le sea posible. ¿Qué efecto tiene un aumento de la tensión de la fuente de la base sobre las variables dependientes del circuito?
- 6-26. Calcule la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado V_{CC} . Verifique las contestaciones. Luego haga un resumen de los resultados en una o dos frases.
- 6-27. Deduzca la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_B . Compruebe las contestaciones. Enumere las variables dependientes que disminuyen y explique por qué disminuyen, usando la ley de Ohm o algún otro concepto básico.
- 6-28. Halle la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_C . Enuncie las variables dependientes que no muestran cambios y explique por qué no muestran cambio.
- 6-29. Obtenga la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado β_{dc} . Enumere las variables dependientes que disminuyen y explique por qué disminuyen.

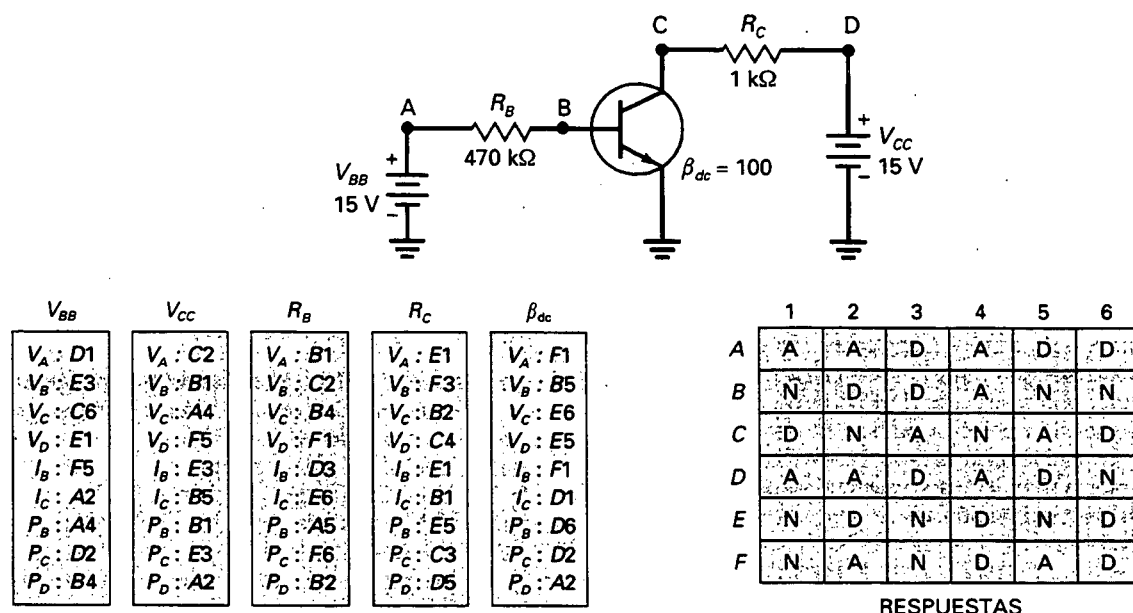


Figura 6-19. Análisis de variables dependientes.

Fundamentos de los transistores

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Saber por qué un circuito con polarización de base no es el más adecuado para trabajar en circuitos amplificadores.
- Identificar el punto de saturación y el punto de corte para un circuito con polarización de base.
- Calcular el punto Q para un circuito con polarización de base.
- Dibujar un circuito con polarización de emisor y explicar por qué funciona bien en circuitos amplificadores.
- Indicar cómo realizar pruebas a los transistores fuera y dentro de los circuitos.

VOCABULARIO

- | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| • circuito conmutador | • corriente de emisor | • recta de carga |
| • circuito conmutador transistorizado | • constante | • saturación |
| • circuito de dos estados | • factor de corrección | • saturación blanda |
| • circuito de transistor amplificador | • fotodiodo | • saturación fuerte |
| • corriente de base constante | • fototransistor | • tensión base-emisor |
| | • polarización de base | • tensión de base |
| | • polarización de emisor | • tensión de colector |
| | • punto de corte | • tensión de emisor |
| | • punto <i>quiescent</i> | • valor del circuito |

Hay dos formas básicas de establecer el punto de trabajo de un transistor: polarización de base y polarización de emisor. La polarización de base produce un valor constante de la corriente de base, mientras que la polarización de emisor produce un valor constante de la corriente de emisor. La polarización de base es más útil en circuitos de conmutación, mientras que la polarización de emisor predomina en los circuitos amplificadores. Este capítulo expone la polarización de base, la polarización de emisor, los circuitos de conmutación y los circuitos optoelectrónicos.

7-1. VARIACIONES DE LA GANANCIA DE CORRIENTE

La ganancia de corriente de un transistor, β_{dc} , depende de tres factores: el transistor, la corriente de colector y la temperatura. Por ejemplo, cuando se reemplaza un transistor por otro del mismo tipo, normalmente cambia la ganancia de corriente. Del mismo modo, si la corriente de colector o la temperatura cambian, la ganancia de corriente cambiará.

❑ Peor y mejor caso

Por ejemplo, la hoja de características de un 2N3904 indica una h_{FE} mínima de 100 y una h_{FE} máxima de 300 cuando la temperatura es 25 °C y la corriente de colector es de 10 mA. Si se producen en serie miles de circuitos que usen el transistor 2N3904, se verá que algunos de los transistores tienen una ganancia de corriente de apenas 100 (peor caso), mientras que en otros la ganancia de corriente llega a ser hasta de 300 (mejor caso).

En la Figura 7-1 se muestra la curva de un 2N3904 para el peor caso (h_{FE} mínima). Fíjese en la curva del medio, la ganancia de corriente para la temperatura ambiente de 25 °C. Cuando la corriente de colector es de 10 mA, la ganancia de corriente es de 100, el peor caso para un 2N3904. (En el mejor caso, unos pocos 2N3904 tienen una ganancia de corriente de 300 a 10 mA y 25 °C).

❑ Efecto de la corriente y la temperatura

Cuando la temperatura es 25 °C (la curva del medio), la ganancia de corriente es 50 a 0,1 mA. A medida que la corriente se incrementa de 0,1 mA a 10 mA, h_{FE} aumenta a un máximo de 100. Después, disminuye a menos de 20 a 200 mA.

Nótese también el efecto de la temperatura. Cuando la temperatura disminuye la ganancia de corriente es menor (curva inferior). Por otro lado, cuando la temperatura aumenta, h_{FE} crece en casi todo el margen de valores de corriente (curva superior.)

❑ Idea principal

Como puede observar, reemplazar un transistor, cambiar la corriente de colector o cambiar la temperatura, puede producir grandes cambios en h_{FE} o β_{dc} . A una temperatura dada, es posible un cambio de 3:1 cuando se reemplaza un transistor. Cuando la temperatura varía, es posible un cambio adicional.

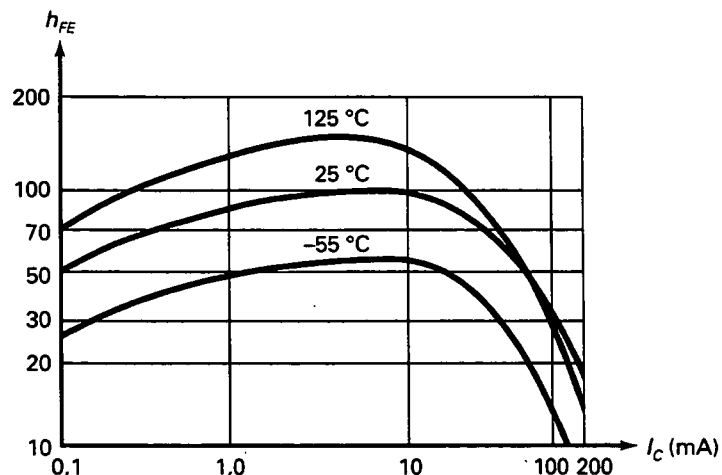


Figura 7-1. Variación de la ganancia de corriente.

nal de 3:1. Y cuando la corriente varía, es posible una variación mayor que 3:1. En resumen, el 2N3904 puede tener una ganancia de corriente menor que 10 a una mayor que 300. A causa de esto, cualquier diseño que dependa de un valor preciso de ganancia de corriente fallará en la producción en serie.

7-2. LA RECTA DE CARGA

La Figura 7-2a muestra la conexión EC expuesta en el capítulo 6. Dados los valores de R_B y β_{dc} , podemos calcular la corriente de colector I_C y la tensión de colector V_{CE} usando los métodos del capítulo anterior.

□ Polarización de base

El circuito de la Figura 7-2a es un ejemplo de *polarización de base*, lo que significa establecer un valor constante para la *corriente de base*. Por ejemplo, si R_B es igual a $1\text{ M}\Omega$, la corriente de base es $14,3\text{ }\mu\text{A}$ (segunda aproximación). Incluso si se reemplaza el transistor o cambia la temperatura, la corriente de base permanece constante a aproximadamente $14,3\text{ }\mu\text{A}$ bajo todas las condiciones de funcionamiento.

Si $\beta_{dc} = 100$ en la Figura 7-2a, la corriente de colector es aproximadamente $1,43\text{ mA}$ y la tensión colector-emisor es:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 15\text{ V} - (1,43\text{ mA})(3\text{ k}\Omega) = 10,7\text{ V}$$

Por tanto, el punto quiescent o punto Q en la Figura 7-2 vale:

$$I_C = 1,43\text{ mA} \quad \text{y} \quad V_{CE} = 10,7\text{ V}$$

□ Solución gráfica

También podemos encontrar el punto Q usando una solución gráfica basada en la *recta de carga* de un transistor, una gráfica de I_C versus V_{CE} . En la Figura 7-2a, la tensión colector-emisor viene dada por:

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

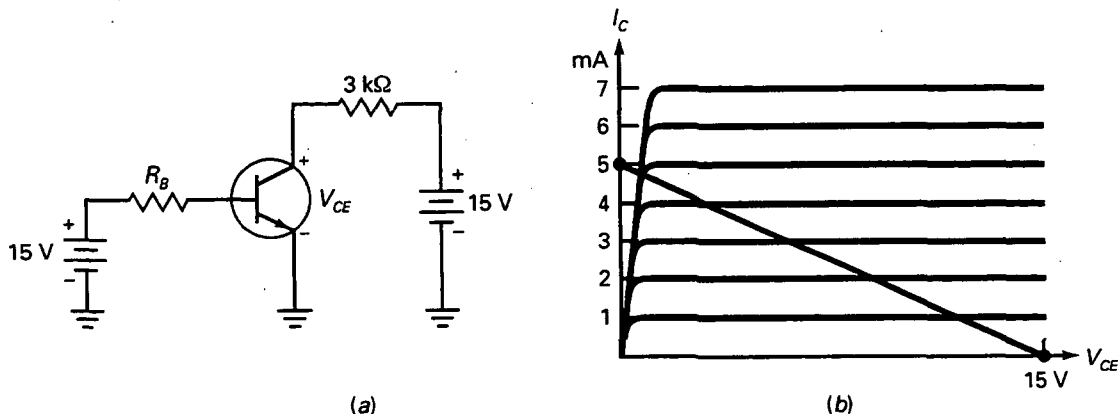


Figura 7-2. Polarización de base. a) Circuito; b) recta de carga.

Resolviendo para I_C nos da:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad (7-1)$$

Si representamos esta ecuación (I_C frente a V_{CE}) obtendremos una línea recta que se denomina *recta de carga* porque representa el efecto de la carga en I_C y V_{CE} .

Por ejemplo, sustituyendo los valores de la Figura 7-2a en la Ecuación 7-1, obtenemos:

$$I_C = \frac{15 \text{ V} - V_{CE}}{3 \text{ k}\Omega}$$

Ésta es una ecuación lineal, cuya gráfica es una línea recta. (Nota: Una ecuación lineal es aquella que se puede reducir a la forma estándar $y = mx + b$.) Si representamos la anterior ecuación sobre las curvas de salida, obtenemos la Figura 7-2b.

Los extremos de la recta de carga son los más fáciles de encontrar. Cuando $V_{CE} = 0$ en la ecuación de la recta de carga (la ecuación anterior),

$$I_C = \frac{15 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

Los valores, $I_C = 5 \text{ mA}$ y $V_{CE} = 0$, aparecen como el extremo superior de la recta de carga en la Figura 7-2b. Cuando $I_C = 0$, la ecuación de la recta de carga da:

$$0 = \frac{15 \text{ V} - V_{CE}}{3 \text{ k}\Omega}$$

o

$$V_{CE} = 15 \text{ V}$$

Las coordenadas, $I_C = 0$ y $V_{CE} = 15 \text{ V}$, aparecen como el extremo inferior de la recta de carga en la Figura 7-2b.

☐ Resumen visual de todos los puntos de trabajo

¿Por qué es útil la recta de carga? Porque contiene todos los puntos de trabajo posibles para el circuito. Dicho de otra forma, cuando la resistencia de base cambia de cero a infinito, la corriente de colector y la tensión colector-emisor también cambian. Si se dibuja cada par de valores I_C y V_{CE} , lo que se obtiene es una serie de puntos de trabajo localizados sobre la recta de carga. Por tanto, dicha recta es un *resumen visual de todos los posibles puntos de trabajo del transistor*.

☐ El punto de saturación

Cuando la resistencia de base es demasiado pequeña, hay exceso de corriente de colector, y la tensión colector-emisor tiende a cero. En este caso, el

transistor se satura, lo que significa que la corriente de colector ha crecido hasta su valor máximo posible.

El punto de saturación es el punto en que la recta de carga corta a la zona de saturación de las curvas de salida (Fig. 7-2b). Como la tensión colector-emisor en saturación es muy pequeña, el punto de saturación es casi idéntico al extremo superior de la recta de carga. En lo sucesivo, tomaremos el punto de saturación como aproximadamente igual al extremo superior de la recta de carga, pero recordando siempre que esa aproximación implica un pequeño error.

El punto de saturación indica la máxima corriente de colector que es posible alcanzar en el circuito. En este ejemplo, la máxima corriente de colector posible en la Figura 7-3a es aproximadamente de 5 mA. A esta corriente, V_{CE} ha decrecido aproximadamente a cero.

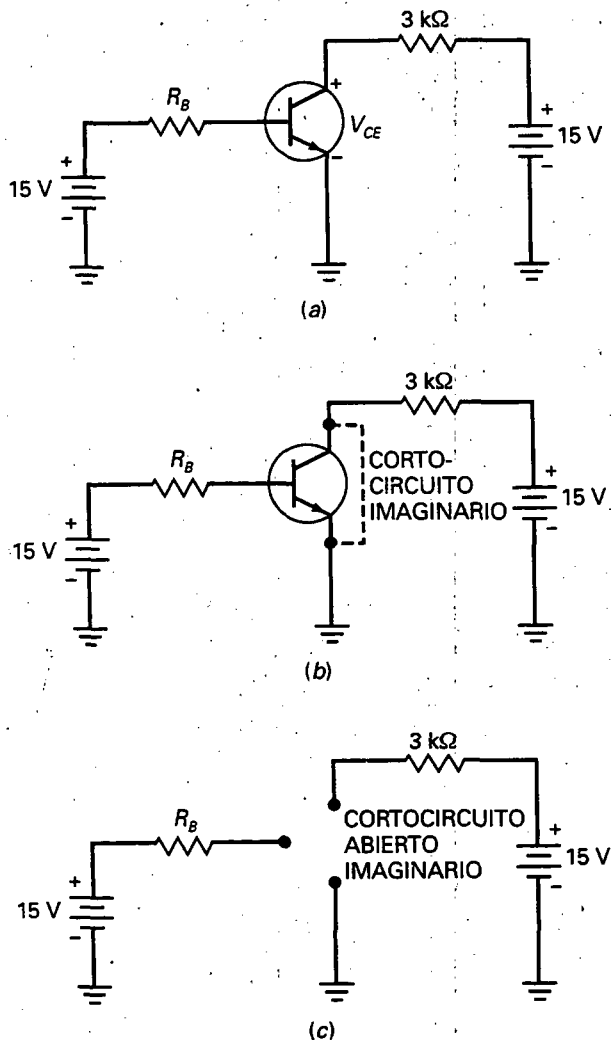


Figura 7-3. Encontrando los extremos de la recta de carga. a) Circuito; b) calculando la corriente de saturación de colector; c) calculando la tensión de corte colector-emisor.

Hay una forma fácil de hallar la corriente en el punto de saturación. Imagínese un cortocircuito entre el colector y el emisor en la Figura 7-3b; entonces, V_{CE} valdrá cero. Los 15 V de la fuente de colector aparecerán en la resistencia de 3 k Ω . Por tanto, la corriente en la resistencia de colector es:

$$I_C = \frac{15 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

Este método se puede aplicar a cualquier circuito con polarización de base.

A continuación se indica la fórmula que corresponde a los circuitos con polarización de base:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (7-2)$$

Así se expresa que el valor de saturación de la corriente de colector es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector dividida entre la resistencia de colector. Recuerde que es simplemente la ley de Ohm aplicada a la resistencia de colector. La Figura 7-3b permite recordar ésta ecuación.

□ El punto de corte

El punto *de corte* es el punto en el que la recta de carga corta a la zona de corte de las curvas de salida en la Figura 7-2b. Como la corriente de colector en corte es muy pequeña, el punto de corte es casi idéntico al extremo inferior de la recta de carga. En lo sucesivo supondremos que el punto de corte es aproximadamente igual al extremo inferior de la recta de carga.

El punto de corte indica la máxima tensión colector-emisor que es posible alcanzar en el circuito. En la Figura 7-3a, la máxima tensión posible colector-emisor es aproximadamente 15 V, que es el valor de la fuente de tensión del colector.

Hay un procedimiento simple para hallar la tensión de corte. En el transistor de la Figura 7-3a, se visualiza un circuito abierto interno entre el colector y el emisor (Fig. 7-3c). Como no circula corriente en la resistencia de colector para esta situación de circuito abierto, los 15 V de la fuente de polarización de colector aparecerán entre los terminales del colector-emisor. Por tanto, la tensión colector emisor será igual a 15 V:

$$V_{CE(\text{corte})} = V_{CC} \quad (7-3)$$

EJEMPLO 1-1

¿Cuáles son la corriente de saturación y la tensión de corte en la Figura 7-4a?

SOLUCIÓN

Imagínese el cortocircuito entre el colector y el emisor.

Entonces:

$$V_{C(sat)} = \frac{30 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$$

Después se representan los terminales colector-emisor abiertos. En este caso:

$$V_{C(corte)} = 30 \text{ V}$$

EJEMPLO 7-2

Calcule los valores de saturación y corte para la Figura 7-4b. Dibuje las rectas de carga para este ejemplo y el anterior.

SOLUCIÓN

Con un cortocircuito imaginario entre el colector y el emisor:

$$I_{C(sat)} = \frac{9 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

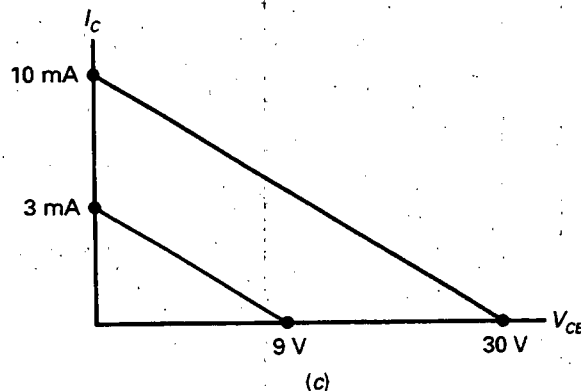
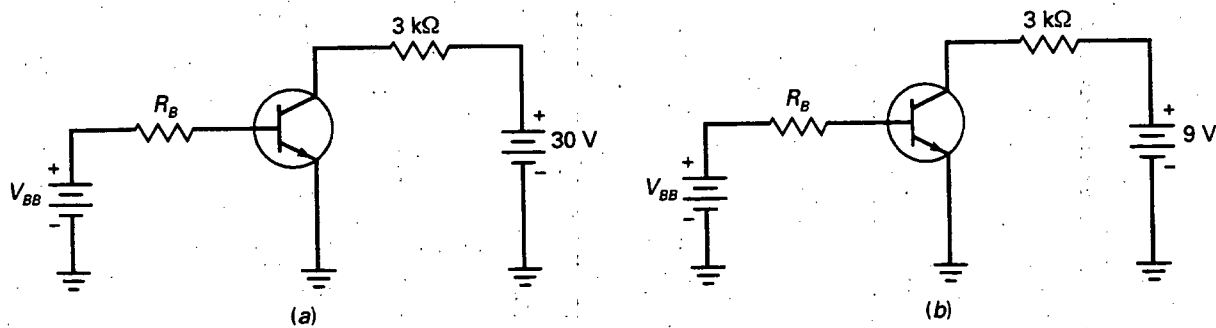


Figura 7-4. Rectas de carga para la misma resistencia de colector. a) Con la fuente de colector de 30 V; b) con la fuente de colector de 9 V; c) las rectas de carga tienen la misma pendiente.

Un circuito abierto imaginario entre el colector y el emisor da:

$$V_{CE(\text{corte})} = 9 \text{ V}$$

La Figura 7-4c muestra las dos rectas de carga. Cambiar la tensión de alimentación de colector mientras se mantiene la misma resistencia de colector produce dos rectas de carga de la misma pendiente pero con diferentes valores de saturación y de corte.

EJEMPLO 7-3

¿Cuáles son la corriente de saturación y la tensión de corte en la Figura 7-5a?

SOLUCIÓN

La corriente de saturación es:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{15 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 15 \text{ mA}$$

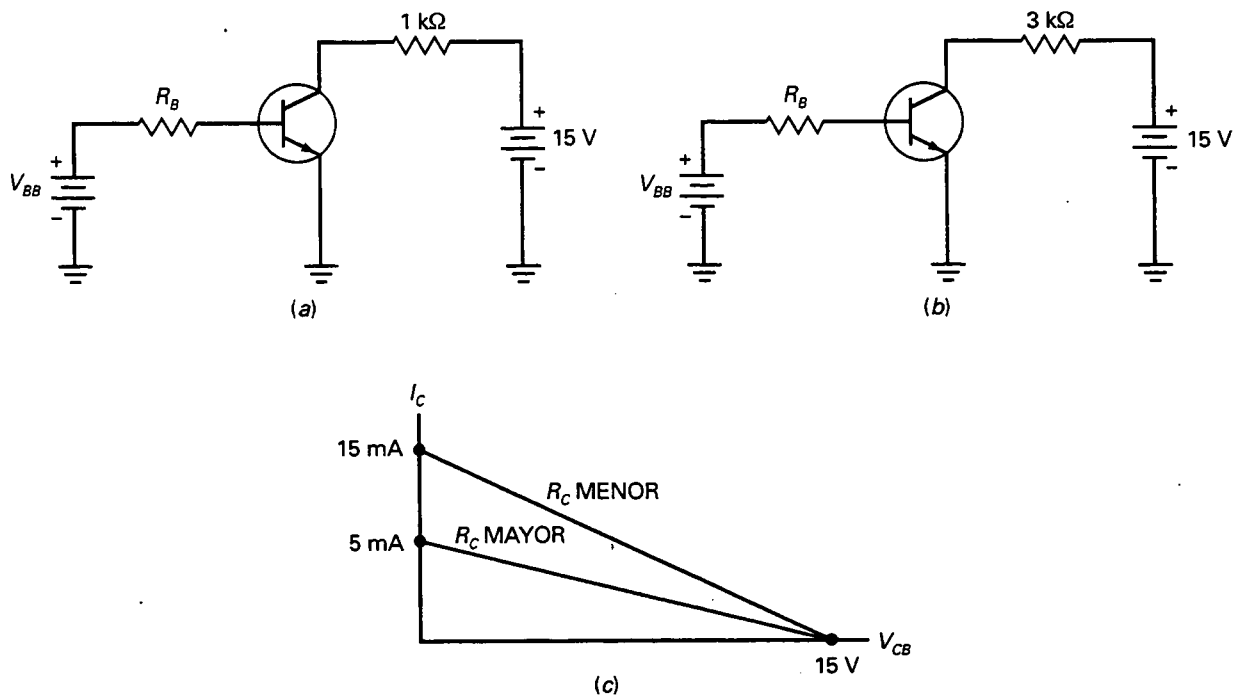


Figura 7-5. Rectas de carga para la misma corriente de colector. a) Con la resistencia de colector de $1 \text{ k}\Omega$; b) con la resistencia de colector de $3 \text{ k}\Omega$; c) menor R_C produce una pendiente más abrupta.

La tensión de corte vale:

$$V_{CE(corte)} = 15 \text{ V}$$

EJEMPLO 7-4

Calcule los valores de saturación y corte para la Figura 7-5b. Después, compare las rectas con las del ejemplo anterior.

SOLUCIÓN

Los cálculos son los siguientes:

$$I_{C(sat)} = \frac{15 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$$

$$V_{CE(corte)} = 15 \text{ V}$$

La Figura 7-5c muestra las dos rectas de carga. Cambiar la resistencia de colector mientras se mantiene la misma tensión de fuente de colector produce dos rectas de carga de diferente pendiente pero con los mismos valores de corte. Note también que una resistencia de carga menor produce una mayor pendiente (más inclinada o cerca de la vertical). Esto sucede porque la pendiente de la recta de carga es igual al recíproco de la resistencia de carga:

$$\text{Pendiente} = \frac{1}{R_C}$$

7-3. EL PUNTO DE TRABAJO

Cada circuito con transistores tiene su propia recta de carga. Dado un circuito se pueden calcular la corriente de saturación y la tensión de corte. Estos valores se dibujan en los ejes vertical y horizontal, respectivamente, para trazar una recta a través de estos dos puntos para obtener la recta de carga.

□ Determinación del punto Q

La Figura 7-6a muestra un circuito con polarización de base cuya resistencia de base es de $500 \text{ k}\Omega$. La corriente de saturación y la tensión de corte se obtienen mediante el proceso indicado anteriormente. En primer lugar, se supone un cortocircuito entre los terminales colector-emisor. Entonces toda la tensión de la fuente de polarización de colector aparece en la resistencia de colector, lo que da una corriente de saturación de 5 mA . En segundo lugar, se imagina que los terminales colector-emisor están abiertos. En ese

caso no hay corriente, y toda la tensión de fuente aparece en los terminales colector-emisor, lo que da una tensión de corte de 15 V. Si se halla la corriente de saturación y la tensión de corte, se puede dibujar la recta de carga que se ve en la Figura 7-6b.

Para simplificar las cosas, supongamos por el momento que el transistor es ideal. Tal suposición implica que toda la tensión de la fuente de la base aparecerá entre los extremos de la resistencia de base. Por tanto, la corriente de base es:

$$I_B = \frac{15 \text{ V}}{500 \text{ k}\Omega} = 30 \text{ }\mu\text{A}$$

No podemos continuar si no disponemos de un valor para la ganancia de corriente. Supóngase que la ganancia de corriente de este transistor es de 100. Entonces la corriente de colector vale:

$$I_C = 100(30 \text{ }\mu\text{A}) = 3 \text{ mA}$$

Esta corriente, al circular por los 3 k Ω , produce una tensión de 9 V en la resistencia de colector. Cuando esta cifra se resta del valor de la fuente de tensión de colector, se obtiene la tensión colector-emisor del transistor. Los cálculos son éstos:

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (3 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 6 \text{ V}$$

Llevando a la gráfica las coordenadas 3 mA y 6 V (la corriente y la tensión de colector), se obtiene el punto de trabajo mostrado en la recta de carga de la Figura 7-6b. El punto de trabajo se indica mediante una *Q*, ya que (en inglés) a menudo se le llama *quiescent point*. (*Quiescent* significa quieto, inmóvil, en reposo.)

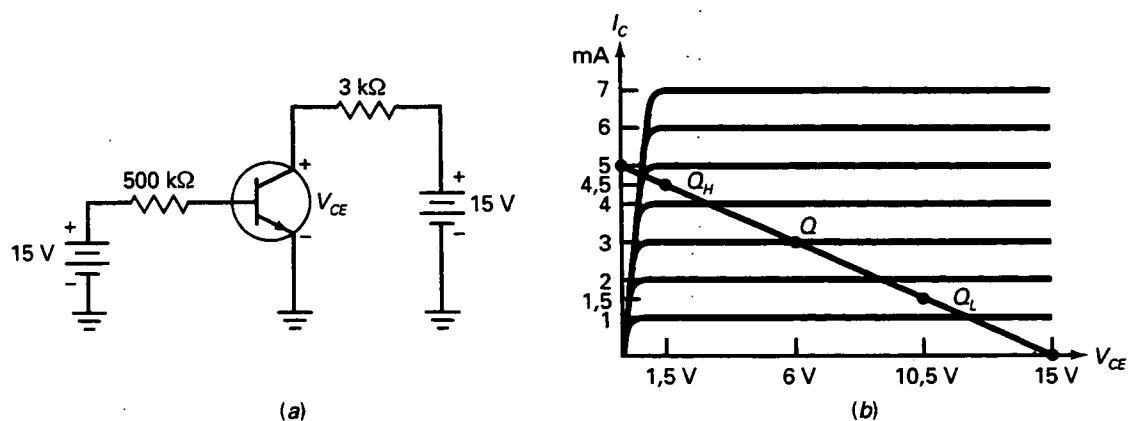


Figura 7-6. Cálculo del punto *Q*. *a*) Circuito; *b*) el cambio en la ganancia de corriente cambia el punto *Q*.

□ ¿Por qué fluctúa el punto Q ?

Se supuso una ganancia de corriente igual a 100. ¿Qué sucede si la ganancia de corriente es de 50? ¿Y si es de 150? Ante todo, la corriente de base no cambia porque en este circuito la ganancia de corriente no tiene efecto sobre la corriente de base. En teoría, la corriente de base es de $30 \mu\text{A}$. Si la ganancia de corriente es de 50, entonces

$$I_C = 50(30 \mu\text{A}) = 1,5 \text{ mA}$$

y la tensión colector-emisor vale

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (1,5 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 10,5 \text{ V}$$

Trazando los valores se obtiene el punto Q_L , que se ve en la Figura 7-6b. Si la ganancia de corriente es de 150, entonces

$$I_C = 150(30 \mu\text{A}) = 4,5 \text{ mA}$$

y la tensión colector-emisor es

$$V_{CE} = 15 \text{ V} - (4,5 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 1,5 \text{ V}$$

Trazando estos valores se obtiene el punto Q_H , como se aprecia en la Figura 7-6b.

Los tres puntos Q de la Figura 7-6b ilustran lo sensible que es el punto de trabajo de un transistor con polarización de base a cambios en β_{dc} . Cuando la ganancia de corriente varía de 50 a 150, la corriente de colector cambia de 1,5 a 4,5 mA. Si los cambios en la ganancia de corriente fueran mucho mayores, el punto de trabajo puede llevar fácilmente a saturación o corte.

□ Las fórmulas

Las fórmulas para calcular el punto Q son las siguientes:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (7-4)$$

$$I_C = \beta_{dc} I_B \quad (7-5)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (7-6)$$

EJEMPLO 7-5

Suponga que la resistencia de base en la Figura 7-6a aumenta a $1 \text{ M}\Omega$. ¿Qué sucede con la tensión colector-emisor si β_{dc} vale 100?

SOLUCIÓN

Idealmente, la corriente de base disminuirá a $15\text{ }\mu\text{A}$, la corriente de colector disminuirá a 1.5 mA y la tensión colector-emisor aumentará a:

$$V_{CE} = 15 - (1.5\text{ mA})(3\text{ k}\Omega) = 10.5\text{ V}$$

Haciendo uso de la segunda aproximación, la corriente de base disminuirá a $14.3\text{ }\mu\text{A}$ y la corriente de colector a 1.43 mA . Además, el nuevo valor de la tensión colector-emisor aumentará a:

$$V_{CE} = 15 - (1.43\text{ mA})(3\text{ k}\Omega) = 10.7\text{ V}$$

7-4. CÓMO RECONOCER LA SATURACIÓN

Hay dos tipos básicos de circuitos de transistores: *amplificadores* y *conmutadores*. Con los circuitos amplificadores, el punto Q debe permanecer en la zona activa bajo todas las condiciones de funcionamiento. Si no lo hace, la señal de salida se verá distorsionada en los picos, donde ocurren la saturación y el corte. Con los conmutadores, el punto Q normalmente conmuta entre saturación y corte. Cómo funcionan los circuitos conmutadores, qué hacen y por qué se usan se expondrá más adelante.

Reducción al absurdo

Suponga que el transistor de la Figura 7-7a tiene una tensión de ruptura mayor que 20 V . Entonces sabemos que no está funcionando en la zona de ruptura. Además, podemos deducir por las tensiones de polarización que el transistor no está actuando en la zona de corte. Sin embargo, lo que no está tan claro es si el transistor está trabajando en la zona activa o en la de saturación. Debe estar haciéndolo en una de las dos regiones, pero ¿en cuál?

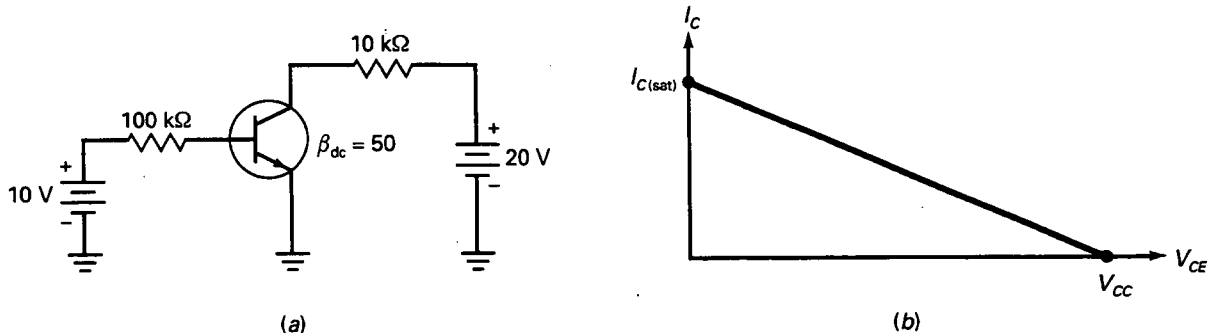


Figura 7-7. a) Circuito con polarización de base; b) recta de carga.

Las personas que detectan averías y los diseñadores suelen usar el siguiente método para saber si un transistor está funcionando en la zona activa o en la de saturación. Éstos son los pasos del método:

1. Se supone que el transistor funciona en la zona activa.
2. Se calculan las tensiones y corrientes.
3. Si algún resultado es absurdo, la suposición es falsa. Una respuesta absurda significa que el transistor está funcionando en la zona de saturación. En otro caso, el transistor trabaja en la zona activa.

❑ Método de la corriente de saturación

Por ejemplo, la Figura 7-7a muestra un circuito con polarización de base. Se comienza calculando la corriente de saturación:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

La corriente de base es, idealmente, 0,1 mA. Suponiendo una ganancia de corriente de 50, como se indica, la corriente del colector es:

$$I_C = 50(0,1 \text{ mA}) = 5 \text{ mA}$$

La respuesta es absurda porque la corriente de colector no puede ser mayor que la de saturación. Por tanto, el transistor no puede funcionar en la zona activa. Debe estar haciéndolo en la zona de saturación.

❑ Método de la tensión de colector

Se supone que se quiere calcular V_{CE} en la Figura 7-7a. Entonces se puede proceder de la siguiente forma: la corriente de base es, idealmente, 0,1 mA. Imaginando una ganancia de corriente de 50, como se indica, la corriente del colector es:

$$I_C = 50(0,1 \text{ mA}) = 5 \text{ mA}$$

Y la tensión colector-emisor vale:

$$V_{CE} = 20 \text{ V} - (5 \text{ mA})(10 \text{ k}\Omega) = -30 \text{ V}$$

Este resultado es absurdo, porque la tensión colector-emisor no puede ser negativa; así, el transistor no puede estar funcionando en la zona activa, por lo que debe estar haciéndolo en la zona de saturación.

❑ La ganancia de corriente es menor en la zona de saturación

Cuando se da la ganancia de corriente, casi siempre es para la zona activa. Así, por ejemplo, la ganancia de corriente en la Figura 7-7a es de 50, según

250 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

se indica, lo que quiere decir que la corriente de colector será 50 veces mayor que la corriente de base, suponiendo que el transistor funcione en la zona activa.

Cuando un transistor está saturado, la ganancia de corriente es menor que la que se da en la zona activa. La ganancia de corriente saturada se puede calcular como sigue:

$$\beta_{dc(sat)} = \frac{I_{C(sat)}}{I_B}$$

La ganancia de corriente de saturación para el circuito de la Figura 7-7 es:

$$\beta_{dc(sat)} = \frac{2 \text{ mA}}{0,1 \text{ mA}} = 20$$

□ Saturación fuerte

Un diseñador que desea que un transistor funcione en la zona de saturación bajo todas las condiciones, elige a menudo una resistencia de base que produzca una ganancia de corriente en saturación igual a 10. A esto se le llama *saturación fuerte*, porque es una corriente de base más que suficiente para saturar el transistor. Por ejemplo, una resistencia de base de 50 kΩ en la Figura 7-7a producirá una ganancia de corriente de:

$$\beta_{dc} = \frac{2 \text{ mA}}{0,2 \text{ mA}} = 10$$

Para el transistor de la Figura 7-7a necesita sólo

$$I_B = \frac{2 \text{ mA}}{50} = 0,04 \text{ mA}$$

para saturar el transistor. Por tanto, una corriente de base de 0,2 mA hace funcionar al transistor en saturación.

¿Por qué un diseñador emplea la saturación fuerte? Recuérdese que la ganancia de corriente cambia con la corriente de colector, con las variaciones de temperatura y la sustitución del transistor. A fin de garantizar que el transistor no se salga de la saturación para corrientes de colector pequeñas, bajas temperaturas, etc., el diseñador emplea la saturación fuerte para asegurar la saturación del transistor en todas las condiciones de funcionamiento.

En adelante, *saturación fuerte* se referirá a cualquier diseño que tenga una ganancia de corriente en saturación aproximadamente igual a 10. *Saturación suave* se referirá a cualquier diseño que apenas ponga en saturación al transistor, es decir, en el que la ganancia de corriente en saturación sea sólo un poco menor que la ganancia de corriente en la zona activa.

❑ Cómo reconocer la saturación fuerte de un vistazo

He aquí cómo se puede saber rápidamente si un transistor está en saturación fuerte. A menudo, el valor de la fuente de polarización de la base y del colector son iguales: $V_{BB} = V_{CC}$. Cuando es así, el diseñador aplica la regla 10 : 1, que dice que hay que hacer la resistencia de base aproximadamente 10 veces mayor que la resistencia de colector.

La Figura 7-8a se dibujó aplicando la regla 10 : 1. De este modo, siempre que se vea un circuito con una relación 10 : 1 (R_B a R_C) puede esperarse que esté saturado.

EJEMPLO 7-6

Suponga que la resistencia de base en la Figura 7-7a se aumenta a $1\text{ M}\Omega$. ¿Sigue el transistor en saturación?

SOLUCIÓN

Suponga que el transistor está funcionando en la zona activa y vea si tal circunstancia produce una contradicción. Idealmente, la corriente de base es igual a 10 V dividido entre $1\text{ M}\Omega$; es decir, $10\text{ }\mu\text{A}$. La corriente de colector es 50 multiplicado por $10\text{ }\mu\text{A}$; o sea, $0,5\text{ mA}$. Esta corriente produce 5 V en la resistencia de colector. Restó 5 a 20 V para obtener:

$$V_{CE} = 15\text{ V}$$

En este caso no hay contradicción. Si el transistor hubiera estado saturado, se habría alcanzado un número negativo o, a lo más, 0 V . Como logramos 15 V , sabemos que el transistor está funcionando en la zona activa.

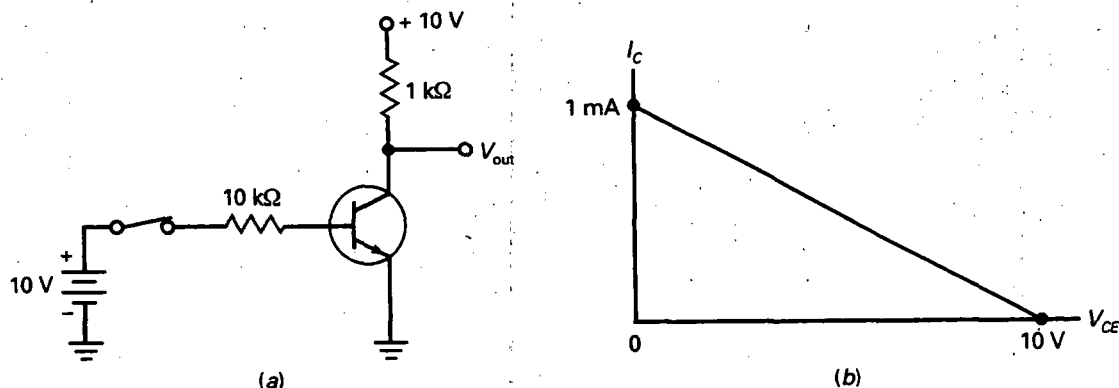


Figura 7-8. a) Saturación fuerte; b) recta de carga.

EJEMPLO 7-7

Suponga que la resistencia de colector en la Figura 7-7a disminuye a 5 k Ω . ¿Se mantiene el transistor en la zona de saturación?

SOLUCIÓN

Suponga que el transistor está funcionando en la zona activa e investigue si se produce por ella alguna contradicción. Podemos usar el mismo enfoque del Ejemplo 7-6; no obstante, para cambiar, intentémoslo con el segundo método.

Comencemos calculando el valor de saturación de la corriente de colector. Imaginemos un cortocircuito entre el colector y el emisor. Entonces se puede ver que habrá 20 V en la resistencia de 5 k Ω , lo que da una corriente de colector en saturación de

$$I_{C(sat)} = 4 \text{ mA}$$

Idealmente, la corriente de base es igual a 10 V dividido entre 100 k Ω , o sea, 0.1 mA. La corriente de colector es 50 veces 0.1 mA, es decir, 5 mA.

Hay una contradicción. La corriente de colector no puede ser mayor que 4 mA, ya que el transistor se satura cuando $I_C = 4 \text{ mA}$. Lo único que puede cambiar en ese punto es la ganancia de corriente. La corriente de la base sigue siendo de 0.1 mA, pero la ganancia de corriente se reduce a

$$\beta_{dc(sat)} = \frac{4 \text{ mA}}{0.1 \text{ mA}} = 40$$

Este hecho refuerza la idea expuesta antes. Un transistor tiene dos ganancias de corriente: una en la zona activa y otra en la zona de saturación; esta última es igual o menor que la primera.

7-5. EL TRANSISTOR EN CONMUTACIÓN

La polarización de base es útil en los *circuitos digitales*, ya que, por lo general, estos circuitos se diseñan para funcionar en saturación y en corte. Por ello tienen una tensión de salida baja o alta; dicho con otras palabras: no se emplea ningún punto Q entre saturación y corte. Debido a este motivo, las variaciones en el punto Q no tienen importancia, pues el transistor se mantiene en saturación o en corte al cambiar la ganancia de corriente.

A continuación se dará un ejemplo de cómo se usa un circuito con polarización de base para conmutar (cambiar) entre saturación y corte. La Figura 7-8a muestra un ejemplo de un transistor en saturación fuerte. Consecuentemente, la tensión de salida es aproximadamente de 0 V, lo que implica que el punto Q se halla en un extremo superior de la recta de carga (Fig. 7-8b).

Cuando el conmutador se abre, la corriente de base se hace cero, por lo que la corriente de colector también se hace cero. Al no haber corriente en la resistencia de $1\text{ k}\Omega$, toda la tensión de la fuente de colector aparece entre los terminales colector-emisor. Por tanto, la tensión de salida crece hasta 10 V . Ahora el punto Q está en el extremo inferior de la recta de la carga (Fig. 7-8b).

El circuito sólo puede tener dos tensiones de salida: 0 V o $+10\text{ V}$. Así es como se puede reconocer un circuito digital: sólo tiene dos niveles de salida, bajo o alto. Los valores exactos de las dos tensiones de salida no son importantes, pero sí lo es que las tensiones se puedan diferenciar en su nivel bajo o alto.

A los circuitos digitales a menudo se les llama *circuitos de conmutación* porque su punto Q conmuta o cambia entre dos puntos de la recta de carga. En la mayor parte de los diseños esos dos puntos son el de saturación y el de corte. Otro nombre que también se acostumbra a darles es el de *circuitos de dos estados*, refiriéndose a las salidas a nivel alto y bajo.

EJEMPLO 7-8

La tensión de la fuente de colector en la Figura 7-8a se reduce a 5 V . ¿Cuáles son los dos valores de la tensión de salida? Si la tensión de saturación $V_{CE(sat)}$ es de 0.15 V y la corriente de fugas de colector I_{CEO} es de 50 nA , ¿qué dos valores de la tensión de salida posee?

SOLUCION

El transistor conmuta entre la saturación y el corte. Idealmente los dos valores de tensión de salida deberían ser 0 V y 5 V . El primero corresponde a la tensión en el transistor saturado y el segundo a la tensión en el transistor en corte.

Si se incluyen los efectos de la tensión de saturación y de la corriente de fugas de colector, las tensiones de salida deben ser 0.15 V y 5 V . La primera es la tensión en el transistor saturado; 0.15 V . La segunda es la tensión colector-emisor con 50 nA circulando por $1\text{ k}\Omega$:

$$V_{CE} = 5\text{ V} - (50\text{ nA})(1\text{ k}\Omega) = 4.99995\text{ V}$$

y que se redondea a 5 V .

A menos que sea un diseñador, es una pérdida de tiempo incluir la tensión de saturación y la corriente de fugas en los cálculos para los circuitos de conmutación. En éstos lo único que se requiere son dos tensiones diferentes entre sí, una a nivel bajo y otra a nivel alto. No importa si la tensión a nivel bajo es de 0 , 0.1 , 0.15 V , etc. De forma análoga, no molesta si la tensión a nivel alto es de 5 , 4.9 o 4.5 V . Por lo general, lo único que interesa en el análisis de los circuitos de conmutación es que el nivel bajo se pueda distinguir del nivel alto.

7-6. POLARIZACIÓN DE EMISOR

Los circuitos digitales son el tipo de circuitos que se emplean en los ordenadores; en esta aplicación, la polarización de base y los circuitos derivados de ella son útiles. Pero cuando se trata de amplificadores se necesitan circuitos cuyos puntos Q sean inmunes a los cambios en la ganancia de corriente.

La Figura 7-9 muestra la *polarización de emisor*. Como se puede ver, la resistencia se ha cambiado del circuito de base al circuito emisor. Ese único cambio provoca una enorme diferencia. El punto Q para este nuevo circuito es ahora inamovible. Cuando la ganancia de corriente cambia de 50 a 150, el punto Q casi no se desplaza sobre la recta de carga.

❑ Idea básica

La fuente de polarización de la base se aplica ahora directamente a la base. Por tanto, un detector de averías hallará V_{BB} entre la base y la masa. El emisor ya no está puesto a tierra. Ahora la tensión de emisor es mayor que la de masa y está dada por

$$V_E = V_{BB} - V_{BE} \quad (7-7)$$

Si V_{BB} es 20 veces mayor que V_{BE} , la aproximación ideal será la adecuada. Si V_{BB} es 20 veces menor que V_{BE} , puede ser conveniente utilizar la segunda aproximación.

❑ Cómo hallar el punto Q

Analicemos el circuito con polarización de emisor de la Figura 7-10. La fuente de polarización de base es sólo de 5 V, por lo que emplearemos la segunda aproximación. La tensión entre la base y masa es de 5 V. De ahora en adelante nos referiremos a esta tensión base-masa simplemente como la *tensión de base*; o sea, V_B .

La tensión entre los terminales base-emisor es de 0,7 V. A esta tensión la llamaremos *tensión base-emisor*, o V_{BE} .

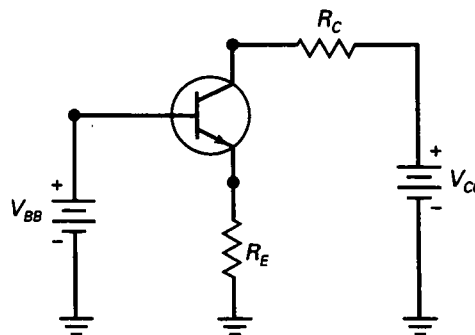


Figura 7-9. Polarización de emisor.

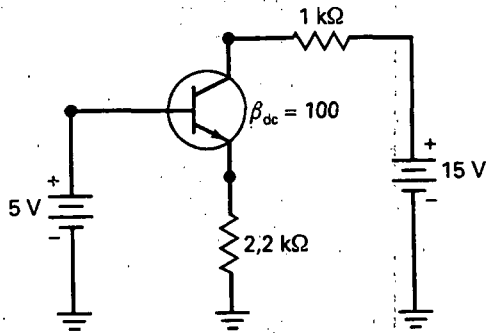


Figura 7-10. Encontrando el punto Q .

La tensión entre el emisor y masa será llamada *tensión de emisor*. Es igual a

$$V_E = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$$

Dicha tensión está presente entre los extremos de la resistencia de emisor, por lo que se puede usar la ley de Ohm para calcular la corriente de emisor:

$$I_E = \frac{4,3 \text{ V}}{2,2 \text{ k}\Omega} = 1,95 \text{ mA}$$

Esto supone que, en muy buena aproximación, la corriente de colector es de 1,95 mA. Cuando esta corriente de colector circula por la resistencia de colector, produce una caída de tensión de 1,95 V. Restando este valor de la tensión de la fuente de colector se obtiene la tensión entre el colector y masa:

$$V_C = 15 \text{ V} - (1,95 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 13,1 \text{ V}$$

De ahora en adelante, nos referiremos a esta tensión de colector a masa simplemente como *tensión de colector*.

Ésta es la tensión que un detector de averías mediría al probar un circuito transistorizado. Obsérvese que uno de los terminales del voltímetro se conectaría al colector, mientras que el otro terminal se conectaría a masa. Si se desea la tensión colector-emisor, hay que restar la tensión de emisor a la tensión de colector, como sigue:

$$V_{CE} = 13,1 \text{ V} - 4,3 \text{ V} = 8,8 \text{ V}$$

Así, el circuito con polarización de emisor de la Figura 7-10 tiene un punto Q con estas coordenadas: $I_C = 1,95 \text{ mA}$ y $V_{CE} = 8,8 \text{ V}$.

La tensión colector-emisor es la tensión empleada para dibujar las rectas de carga y para leer las hojas de características del transistor. Como fórmula:

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (7-8)$$

□ El circuito es inmune a los cambios de la ganancia de corriente

Ahora se verá dónde radica la importancia de la polarización de emisor. El punto Q de un circuito con polarización de emisor es inmune a los cambios de la ganancia de corriente. Examinando el proceso empleado para analizar el circuito se puede ver la razón de esta característica. Éstos son los pasos que se aplicaron anteriormente:

1. Obtener la tensión de emisor.
2. Calcular la corriente de emisor.
3. Hallar la tensión de colector.
4. Restar la tensión de emisor de la tensión de colector para obtener V_{CE} .

En ningún momento hubo necesidad de utilizar la ganancia de corriente en el proceso anterior. Como ésta no se emplea para calcular la corriente de emisor, la corriente de colector, etc., su valor exacto ya no es importante.

Al cambiar la resistencia del circuito de base al circuito de emisor, se obliga a que la tensión de la base a masa sea igual a la tensión de la fuente de base. Anteriormente, casi toda esta tensión aparecía en la resistencia de base, estableciendo una *corriente fija en la base*. Ahora, toda esta tensión de la fuente menos 0,7 V aparece en la resistencia de emisor, estableciendo una *corriente fija en el emisor*.

□ Pequeño efecto de la ganancia de corriente

La ganancia de corriente tiene un efecto muy pequeño sobre la corriente de colector. En todas las condiciones de funcionamiento las tres corrientes están relacionadas por la ecuación

$$I_E = I_C + I_B$$

que se puede reescribir como

$$I_E = I_C + \frac{I_C}{\beta_{dc}}$$

Esta ecuación se resuelve para la corriente de colector, obteniéndose

$$I_C = \frac{\beta_{dc}}{\beta_{dc} + 1} I_E \quad (7-9)$$

La cantidad que multiplica I_E recibe el nombre de *factor de corrección*, y es un indicador de cuánto difiere I_C de I_E . Si la ganancia de corriente es de 100, el factor de corrección vale

$$\frac{\beta_{dc}}{\beta_{dc} + 1} = \frac{100}{100 + 1} = 0,99$$

lo que quiere decir que la corriente de colector es igual al 99 por 100 de la corriente de emisor. Por tanto, se comete un error sólo del 1 por 100 si se ignora el factor de corrección y se dice que la corriente de colector es igual a la corriente de emisor.

EJEMPLO 7-9

¿Cuál es la tensión entre el colector y tierra en la Figura 7-11?
¿Y entre el colector y el emisor?

SOLUCIÓN

La tensión de base es de 5 V. La tensión de emisor es 0,7 V menor que ésta, es decir:

$$V_E = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$$

Esta tensión está entre los extremos de la resistencia de emisor, que ahora es de 1 k Ω . Por tanto, la corriente de emisor es 4,3 V dividida entre 1 k Ω :

$$I_E = \frac{4,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 4,3 \text{ mA}$$

La corriente de colector es aproximadamente igual a 4,3 mA. Cuando esta corriente circula por la resistencia de colector (en este caso de 2 k Ω), produce una tensión de

$$I_C R_C = (4,3 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 8,6 \text{ V}$$

Si esta tensión se resta de la tensión de la fuente de colector se obtiene

$$V_C = 15 \text{ V} - 8,6 \text{ V} = 6,4 \text{ V}$$

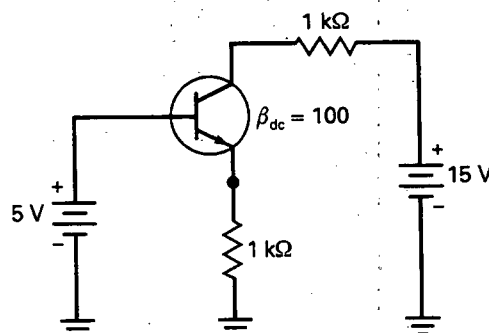


Figura 7-11. Ejemplo.

Recordemos que ésta es la tensión en el colector, es decir, la tensión entre el colector y masa. Si se estuviese detectando averías, ésta es la tensión que mediría.

Como ya se dijo, no se intenta conectar un voltímetro directamente entre el colector y el emisor porque con ello se podría poner el emisor en cortocircuito con la masa. Si lo que se quiere es saber el valor de V_{CE} , se debe medir la tensión colector a tierra, luego medir la tensión emisor a tierra y finalmente restarlos. En tal caso,

$$V_{CE} = 6,4 \text{ V} - 4,3 \text{ V} = 2,1 \text{ V}$$

7-7. EXCITADORES PARA LOS LED

En los apartados anteriores se ha visto que los circuitos con polarización de base establecen un valor fijo para la corriente de base y que los circuitos con polarización de emisor lo hacen para la corriente de emisor. Debido al problema de la ganancia de corriente, los circuitos con polarización de base, por lo común, se diseñan para conmutar entre la saturación y el corte, mientras que los que poseen polarización de emisor habitualmente se diseñan para funcionar en la zona activa.

En esta sección se verán dos circuitos que pueden ser utilizados como excitadores para los LED. El primer circuito emplea polarización de base, mientras que el segundo utiliza polarización de emisor. Esto dará la oportunidad de ver cómo funciona cada circuito en la misma aplicación.

□ Transistor con polarización de base como excitador para el LED

En la Figura 7-12a, la corriente de base es cero, lo que significa que el transistor se halla en corte. Cuando se cierra el interruptor de dicha figura, el transistor entra en saturación fuerte. Imaginemos que hay un cortocircuito entre los terminales colector-emisor. Entonces la tensión de la fuente de colector (15 V) aparece entre la resistencia de 1,5 kΩ y el LED. Si se ignora la caída de tensión en el LED, idealmente la corriente de colector debe ser de 10 mA. Pero si se admite una caída de 2 V en el LED, entonces habrá 13 V en la resistencia de 1,5 kΩ y la corriente de colector será igual a 13 V dividido entre 1,5 kΩ; es decir, 8,67 mA.

Este circuito no plantea ningún problema. Constituye un buen excitador para los LED, ya que está diseñado para la saturación fuerte, en la cual la ganancia de corriente no es importante. Si se desea cambiar la corriente por el LED en este circuito, puede modificarse la resistencia de colector o bien el valor de la fuente de tensión de colector. La resistencia de base se considera 10 veces mayor que la resistencia de colector porque se desea que haya saturación fuerte cuando el interruptor esté cerrado.

□ Transistor con polarización de emisor como excitador para el LED

La corriente de emisor vale cero en la Figura 7-12b, lo que significa que el transistor está en corte. Cuando el interruptor de la Figura 7-12b se cierra,

el transistor entra en la zona activa. Idealmente, la tensión de emisor debe ser de 15 V, lo que representa una corriente de emisor de 10 mA. En tal caso, la caída de tensión en el LED no tiene ningún efecto, no importa si la tensión exacta en el LED es de 1,8, 2 o 2,5 V. Esta es una ventaja del diseño de polarización de emisor con respecto al diseño de polarización de base. La corriente en el LED es independiente de su tensión. Otra ventaja es que el circuito no requiere una resistencia de colector.

El circuito con polarización de emisor en la Figura 7-12b funciona en la zona activa si el interruptor está cerrado. Para cambiar la corriente por el LED, puede modificarse el valor de la fuente de tensión de base o bien la resistencia de emisor. Por ejemplo, si se cambia la tensión de la fuente de base, la corriente del LED varía en proporción directa.

EJEMPLO 7-10

Se desea que la corriente por un LED sea aproximadamente de 25 mA, si el interruptor está cerrado, en la Figura 7-12b. ¿Cómo se puede lograr?

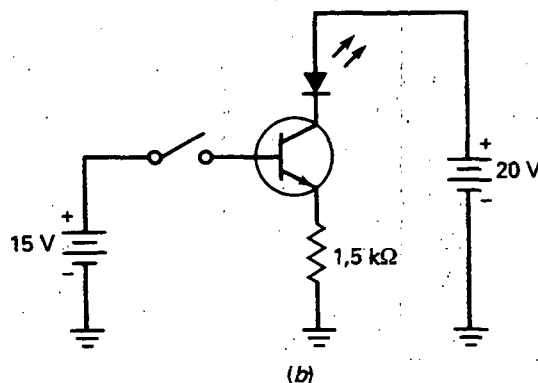
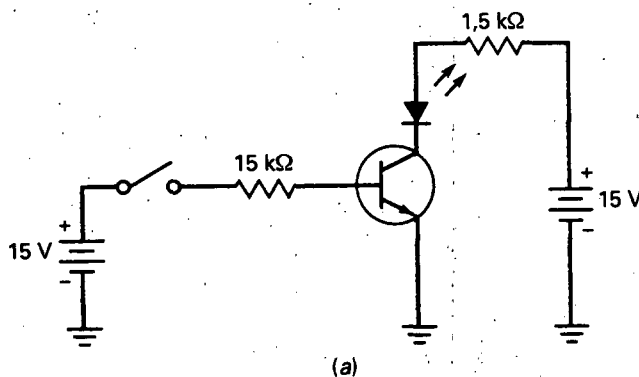


Figura 7-12. a) Polarización de base; b) polarización de emisor.

SOLUCIÓN

Una solución consiste en aumentar la fuente de base. Se desea que circulen 25 mA por la resistencia de emisor de 1,5 k Ω . La ley de Ohm indica que la tensión de emisor debe ser:

$$V_E = (25 \text{ mA})(1,5 \text{ k}\Omega) = 37,5 \text{ V}$$

Idealmente, $V_{BB} = 37,5 \text{ V}$. En la segunda aproximación, $V_{BB} = 38,2 \text{ V}$. Este valor es un poco elevado para las fuentes de alimentación típicas. Pero la solución es realizable si la aplicación particular permite esta elevada tensión en la fuente.

Una tensión de la fuente de 15 V es común en electrónica. Por tanto, una solución mejor en la mayor parte de las aplicaciones consiste en reducir la resistencia de emisor. En el caso ideal, la tensión de emisor debe ser de 15 V, deseando que circulen 25 mA en la resistencia de emisor. De nuevo hace su aparición la ley de Ohm:

$$R_E = \frac{15 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 600 \Omega$$

El valor estándar más cercano con una tolerancia de 5 por 100 es 620 Ω . Si se emplea la segunda aproximación, la resistencia es:

$$R_E = \frac{14,3 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 572 \Omega$$

El valor estándar más cercano es de 560 Ω .

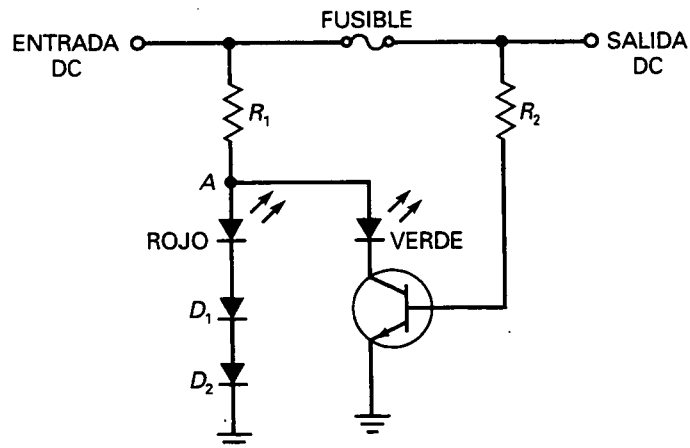


Figura 7-13. Excitador de LED con polarización de emisor.

EJEMPLO 7-11

¿Qué hace el circuito de la Figura 7-13?

SOLUCIÓN

Este es un indicador de fusible fundido para una fuente de alimentación. Cuando el fusible está intacto, el transistor tiene polarización de base en saturación. Esto enciende el LED verde para indicar que todo está correcto. La tensión entre el punto A y masa es aproximadamente 2 V. Esta tensión no es suficiente para encender el LED rojo. Los dos diodos en serie (D_1 y D_2) previenen que el LED rojo se encienda porque requieren una caída de tensión de 1.4 V para conducir.

Cuando el fusible se quema, el transistor pasa a corte, encendiendo la luz roja. Después, la tensión del punto A se incrementa hasta la tensión de la fuente. Ahora hay suficiente tensión para activar los diodos en serie y encender el LED rojo para indicar un fusible fundido.

7-8. EL EFECTO DE PEQUEÑOS CAMBIOS

En capítulos anteriores se introdujo el análisis de variables dependientes, que sirve a cualquiera que desee entender los circuitos. Para el análisis de variables dependientes de la Figura 7-14, un cambio pequeño significa un cambio aproximado del 10 por 100 (la tolerancia de muchas resistencias).

Por ejemplo, la Figura 7-14 muestra un circuito con polarización de emisor con los valores siguientes:

$$V_{BB} = 2 \text{ V} ; V_{CC} = 15 \text{ V} ; R_E = 130 \Omega ; R_C = 470 \Omega$$

Éstas son las variables independientes del circuito (llamadas a menudo *valores del circuito*), ya que sus valores son independientes uno de otro.

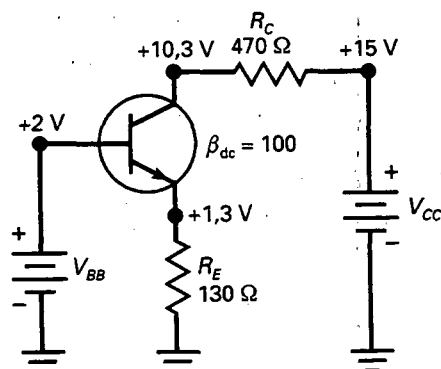


Figura 7-14. Análisis de variables dependientes.

Las tensiones y corrientes restantes son las que aparecen a continuación:

$$V_E = 1,3 \text{ V} ; V_C = 10,3 \text{ V} ; I_B = 99 \text{ } \mu\text{A} ; I_C = 9,9 \text{ mA} ; I_E = 10 \text{ mA}$$

Cada una de ellas es una *variable dependiente* porque su valor puede modificarse cuando una de las variables independientes cambia. Si realmente se entiende cómo funciona un circuito, entonces se puede predecir si una variable dependiente aumenta, disminuye o se mantiene constante cuando alguna de las independientes aumenta.

Supóngase, por ejemplo, que V_{BB} aumenta aproximadamente en un 10 por 100 en la Figura 7-14. ¿El valor de V_C aumentará, disminuirá o se mantendrá constante? Disminuiría, debido a que un aumento en la tensión de la fuente de base hará que aumente la corriente de emisor, que se incremente la corriente de colector, que crezca la tensión en la resistencia de colector y que la tensión de colector disminuya.

En la Tabla 7-1 se resumen los efectos de pequeños cambios en las variables independientes de la Figura 7-14. Se ha empleado *A* para indicar aumento, *D* para disminución y *N* para no cambio (es decir, un cambio menor que el 1 por 100). Además, se ha utilizado la segunda aproximación. Estudiando esta tabla y preguntándose por qué ocurren los cambios, el lector puede profundizar en la comprensión del funcionamiento de este circuito.

7-9. DETECCIÓN DE AVERÍAS

En un transistor hay muchas cosas que pueden presentar problemas. Como contiene dos diodos, el hecho de exceder cualquiera de las tensiones de ruptura, las corrientes máximas o las limitaciones de potencia puede dañar uno o ambos diodos. Los fallos pueden incluir cortocircuitos, circuitos abiertos, grandes corrientes de fugas y un valor reducido de β_{dc} .

□ Pruebas fuera del circuito

Una forma de probar los transistores es utilizar un óhmetro. Se puede comenzar midiendo la resistencia entre el colector y el emisor. Ésta deberá ser muy alta en ambas direcciones, ya que los diodos de colector y de emisor están contrapuestos en serie. Uno de los fallos más comunes es un cortocircuito entre el colector y el emisor, producido al excederse la limitación de

Tabla 7-1. Análisis de variables dependientes

	V_E	I_E	I_B	I_C	V_C	V_{CE}
V_{BB} aumenta	A	A	A	A	D	D
V_{CC} aumenta	N	N	N	N	A	A
R_E aumenta	N	D	D	D	A	A
R_C aumenta	N	N	N	N	D	D

potencia. Si se lee de cero a unos cuantos miles de ohmios en cualquiera de las dos direcciones, el transistor está en cortocircuito y debería reemplazarse.

Suponiendo que la resistencia colector-emisor sea muy alta en ambas direcciones (en megaohmios), entonces se pueden medir las resistencias directa e inversa del diodo colector (terminales base-colector) y del diodo emisor (terminales emisor-base). Lo que se debe obtener es una razón inversa/directa muy alta para los dos diodos, normalmente mayor que 1.000:1 (silicio). En caso contrario el transistor está defectuoso.

Incluso si el transistor pasa las pruebas del óhmetro podría tener algún fallo. Después de todo, con el óhmetro sólo se comprueba cada unión del transistor en condiciones de continua. Puede emplearse un trazador de curvas para detectar problemas más sutiles, tales como una excesiva corriente de fugas, una β_{dc} baja o una tensión de ruptura insuficiente. Existen comprobadores comerciales de transistores; con ellos se verifican la corriente de fugas, el valor de β_{dc} y otros valores.

□ Pruebas dentro del circuito

Las pruebas más simples dentro de un circuito consisten en medir las tensiones del transistor con respecto a masa. Por ejemplo, medir la tensión V_C del colector y la tensión V_E del emisor es un buen comienzo. La diferencia $V_C - V_E$ debe ser mayor que 1 V pero menor que V_{CC} . Si la lectura es menor que 1 V, el transistor podría estar en cortocircuito. Si es igual a V_{CC} , podría estar abierto.

La prueba que se acaba de describir, en general, indica la presencia de un fallo en continua, si es que existe alguno. Muchas personas incluyen una prueba de V_{BE} , del modo que se explica a continuación: se mide la tensión V_B de base y la tensión V_E de emisor. La diferencia de estas lecturas es V_{BE} , que debe estar entre 0,6 y 0,7 V en transistores para pequeña señal funcionando en la zona activa. En transistores de potencia, V_{BE} puede ser de 1 V o más debido a la resistencia interna del diodo emisor. Si el valor de V_{BE} es menor que 0,6 V, el diodo emisor no tiene polarización directa. El fallo podría estar en el transistor o en los elementos de polarización.

Algunas personas incluyen una prueba de corte efectuada como sigue: los terminales base-emisor se ponen en cortocircuito mediante un puente. De esta forma se elimina la polarización directa del diodo emisor, lo que debe obligar al transistor a entrar en la zona de corte. La tensión colector a tierra debe ser igual a la tensión de fuente de polarización del colector. Si no sucede así, algo está fallando en el transistor o en el circuito.

□ Tabla de fallos

Como se vio en el Capítulo 6, un componente en cortocircuito equivale a una resistencia cero y un componente abierto a una resistencia infinita. Por ejemplo, la resistencia de emisor puede estar en cortocircuito o abierta. Designemos estos estados como R_{ES} y R_{EO} , respectivamente. De forma análoga, la resistencia de colector puede estar en cortocircuito o abierta, lo que se simbolizará mediante R_{CS} y R_{CO} , respectivamente.

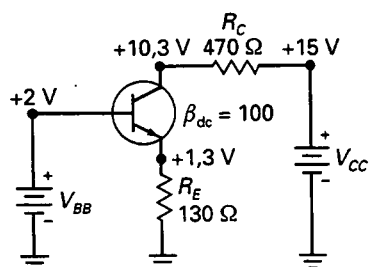


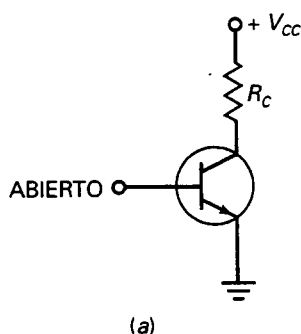
Figura 7-14. Análisis de variables dependientes.

Si un transistor tiene un defecto, pueden presentarse diversos problemas. Por ejemplo, uno o los dos diodos podrían tener un cortocircuito o un circuito abierto internos. Vamos a limitar el número de posibilidades a los defectos más comunes, que son: un cortocircuito colector-emisor (CES) representará los tres terminales en cortocircuito (base, colector y emisor), mientras que un circuito interno abierto colector-emisor (CEO) representa los tres terminales abiertos. Un circuito interno abierto base-emisor (BEO) significa que el diodo base-emisor está abierto, y un circuito interno abierto colector-base (CBO) significa que el diodo colector-base está abierto.

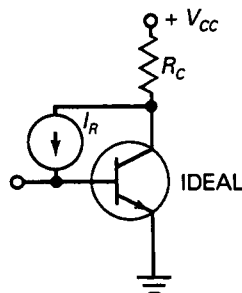
En la Tabla 7-2 se muestran algunas de las averías que podrían presentarse en un circuito como el de la Figura 7-14. Las tensiones se calcularon empleando la segunda aproximación. Si el circuito está funcionando normalmente, debe medirse una tensión de base de 2 V, una tensión de emisor de 1,3 V y una tensión de colector aproximadamente de 10,3 V. Si la resistencia de emisor estuviese en cortocircuito aparecerían +2 V en el diodo emisor. Esta tensión tan elevada destruiría el transistor y ocasionaría quizá un circuito abierto entre el colector y el emisor. En la Tabla 7-2 se indican este fallo R_{ES} y las tensiones asociadas a él.

Si la resistencia de emisor estuviese abierta, no habría corriente en el emisor. Además, la corriente de colector sería cero y la tensión de colector aumentaría a 15 V. En la Tabla 7-2 se muestran este fallo R_{EO} y sus tensiones. Continuando de esta manera, se pueden determinar todas las entradas restantes de la tabla.

Obsérvese la entrada cuando no hay V_{CC} . Es interesante hacer un comentario al respecto. Lo primero que podría pensarse es que la tensión de colector vale cero, ya que no hay tensión en la fuente de colector. Pero eso no es lo que se mediría con un voltímetro. Cuando se conecta un voltímetro entre el colector y la masa, la fuente de polarización de base establecerá una pequeña corriente continua a través del diodo colector que está en serie con el voltímetro. Como la tensión de base está fija en 2 V, la tensión de colector es 0,7 V menor que ésta. Por tanto, el voltímetro indicará 1,3 V entre el colector y masa. Es decir, el voltímetro cierra el circuito a masa, al actuar con una gran resistencia en serie con el diodo colector.



(a)



(b)

Figura 7-15. a) Transistor con la base abierta; b) circuito equivalente.

Tabla 7-2. Fallos y síntomas

Fallo	V_B , V	V_E , V	V_C , V	Comentarios
Ninguno	2	1,3	10,3	No hay problema
R_{ES}	2	0	15	Transistor quemado (CEO)
R_{EO}	2	1,3	15	No hay corriente de base o de colector
R_{CS}	2	1,3	15	
R_{CO}	2	1,3	1,3	
No hay V_{BB}	0	0	15	Verificar la fuente y las conexiones
No hay V_{CC}	2	1,3	1,3	Verificar la fuente y las conexiones
CES	2	2	2	Todos los terminales del transistor en cortocircuito
CEO	2	0	15	Todos los terminales del transistor abiertos
BEO	2	0	15	Diodo base-emisor abierto
CBO	2	1,3	15	Diodo base-colector abierto

7-10. MÁS DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

Como se mencionó antes, un transistor con la base abierta tiene una pequeña corriente de colector formada por los portadores minoritarios producidos térmicamente y las fugas superficiales. Exponiendo la unión de colector a la luz se obtiene un fototransistor, que es un transistor que tiene más sensibilidad a la luz que un fotodiodo.

□ Concepto básico acerca de los fototransistores

La Figura 7-15a (en página anterior) muestra un transistor con la base abierta. Como ya se ha dicho, en este circuito existe una pequeña corriente de colector. Olvidémonos de la corriente de fugas para concentrarnos en los portadores producidos térmicamente en el diodo colector. Imaginemos la corriente inversa generada por estos portadores como un generador de corriente ideal en paralelo con la unión colector-base de un transistor ideal (Fig. 7-15b).

Como la conexión de la base está abierta, toda la corriente inversa se ve obligada a entrar en la base del transistor. La corriente de colector que resulta es

$$I_{CEO} = \beta_{dc} I_R$$

donde I_R es la corriente inversa de portadores minoritarios. Esta ecuación dice que la corriente de colector es mayor que la corriente inversa original por un factor β_{dc} . El diodo colector es sensible tanto a la luz como al calor. En un fototransistor la luz pasa a través de una ventana e incide sobre la unión colector-base. Al aumentar la intensidad de la luz, I_R aumenta y, por consiguiente, I_{CEO} .

□ Diferencias entre un fototransistor y un fotodiodo

La diferencia principal entre un fototransistor y un fotodiodo es la ganancia de corriente β_{dc} . La misma cantidad de luz incidente en ambos dispositivos produce β_{dc} veces más corriente en un fototransistor que en un fotodiodo. La mayor sensibilidad del fototransistor constituye una gran ventaja sobre el fotodiodo.

En la Figura 7-16a se muestra el símbolo de un fototransistor. Obsérvese que la base está abierta. Ésta es la forma normal de funcionamiento de un fototransistor. La sensibilidad se puede controlar mediante una resistencia variable en la base (Fig. 7-16b), pero la base normalmente se deja abierta para obtener la máxima sensibilidad a la luz.

El precio que se paga por un aumento en la sensibilidad es una menor rapidez. Un fototransistor es más sensible que un fotodiodo, pero no se puede activar y bloquear tan rápido como este último. Un fotodiodo tiene corrientes de salida del orden de microamperios y puede conmutar en cuestión de nanosegundos. Por otra parte, el fototransistor tiene corrientes de salida típicas del orden de miliamperios pero sus tiempos de conmutación son del orden de microsegundos.

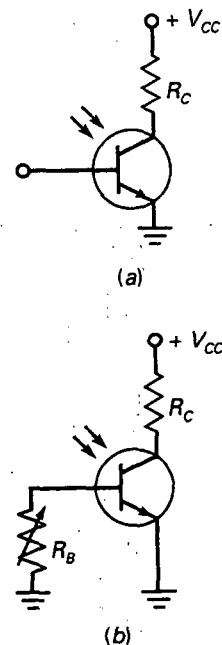


Figura 7-16. Fototransistor. a) La base abierta da sensibilidad máxima; b) una resistencia de base variable cambia la sensibilidad.

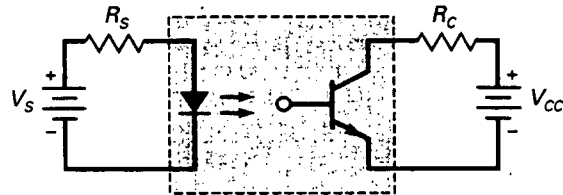


Figura 7-17. Optoacoplador con LED y fototransistor.

□ Optoacoplador

En la Figura 7-17 se muestra un LED excitando un fototransistor. Se trata de un optoacoplador mucho más sensible que el de tipo LED discutido antes. La idea es sencilla. Cualquier cambio en V_s produce alteraciones en la corriente del LED, lo que hace que varíe la corriente del fototransistor. A su vez, tal variación produce una tensión variable en los terminales colector-emisor. Por tanto, hay una tensión de señal acoplada del circuito de entrada

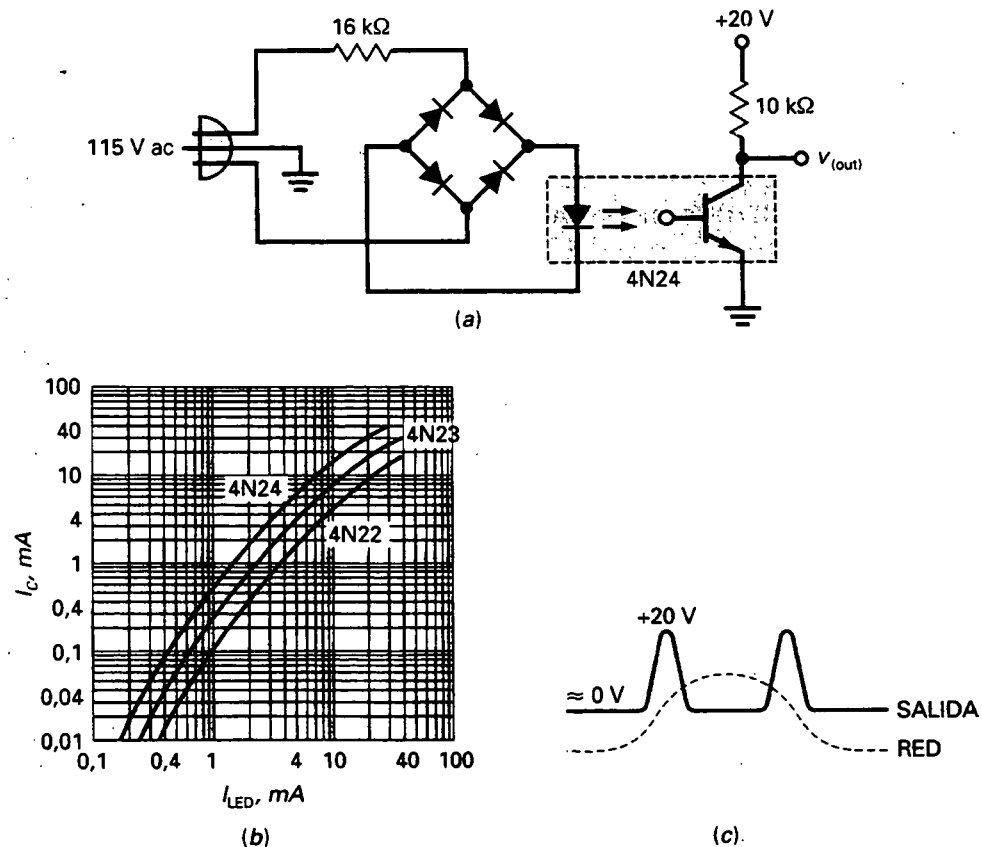


Figura 7-18. a) Detector de cruce por cero; b) curvas estáticas para el optoacoplador; c) salida del detector.

al circuito de salida. La gran ventaja de un optoacoplador reside en el aislamiento eléctrico que puede establecer entre los circuitos de entrada y de salida.

Dicho de otra forma, el terminal común para el circuito de entrada no es el mismo que el terminal común para el circuito de salida. Por esta causa, no existe un camino de conducción entre los circuitos, lo que significa que se puede llevar a masa uno de los dos circuitos y dejar flotante el otro. Así, el circuito de entrada podría estar puesto a masa con el chasis del equipo, mientras que el común del lado de salida podría no estar puesto a masa.

□ Un ejemplo

El optoacoplador 4N24 de la Figura 7-18a (en página anterior) aísla de la red eléctrica y detecta los cruces por cero de la tensión de red. La gráfica en la Figura 7-18b muestra cómo está relacionada la corriente de colector con la corriente del LED. A continuación veremos cómo calcular la tensión de pico de salida del optoacoplador.

El rectificador en puente hace que por el LED circule una corriente rectificada. Ignorando las caídas de tensión en los diodos, la corriente de pico del LED es

$$I_{LED} = \frac{1,414(115 \text{ V})}{16 \text{ k}\Omega} = 10,2 \text{ mA}$$

El valor de la corriente de saturación del fototransistor es

$$I_{C(sat)} = \frac{20 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

En la Figura 7-18b se muestran las curvas estáticas de la corriente del fototransistor en función de la corriente del LED para tres optoacopladores distintos. En el 4N24 (curva superior), una corriente LED de 10,2 mA produce una corriente de colector aproximadamente de 15 mA si la resistencia de carga vale cero. En la Figura 7-18a, la corriente del fototransistor nunca llega a los 15 mA porque el fototransistor se satura a los 2 mA. En otras palabras, en el LED circula una corriente más que suficiente para producir la saturación. Como la corriente de pico del LED es de 10,2 mA, el transistor permanece saturado durante la mayor parte del ciclo. En ese momento, la tensión de salida es aproximadamente cero, como se puede ver en la Figura 7-18c.

Los cruces por cero ocurren cuando la tensión de red cambia de polaridad, de positivo pasa a negativo o a la inversa. En un cruce por cero, la corriente del LED cae a cero. En ese momento el fototransistor se convierte en un circuito abierto y la tensión de salida aumenta aproximadamente a 20 V, como se indica en la Figura 7-18c. Como se puede apreciar, la tensión de salida es casi cero durante la mayor parte del ciclo. En los cruces por cero, aumenta rápidamente a 20 V y a continuación disminuye a cero.

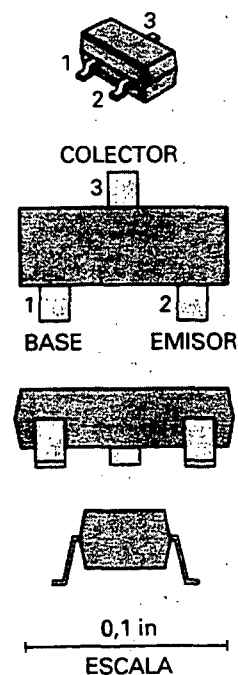


Figura 7-19. El encapsulado SOT-23 es adecuado para transistores SM con limitaciones de potencia menores de 1 W.

Un circuito como el de la Figura 7-18a es útil porque no requiere un transformador para obtener el aislamiento de la red. El optoacoplador es el que se encarga de esto. Además, el circuito detecta los cruces por cero, lo cual es conveniente en aplicaciones en que se quiere sincronizar otro circuito a la frecuencia de la tensión de red.

7-11. TRANSISTORES EN MONTAJE SUPERFICIAL

Los transistores en montaje superficial se encuentran normalmente en encapsulados simples de tres terminales en forma de ala de gaviota. El encapsulado SOT-23 es el menor de los dos, y se usa para transistores limitados al rango de los milivatios. El SOT-89 es el encapsulado más grande y se usa cuando la limitación de potencia es del orden de 1 W.

En la Figura 7-19 (en página anterior) se muestra un típico encapsulado SOT-23. Visto desde arriba, los terminales están numerados en el sentido contrario a las agujas del reloj, siendo el terminal 3 el que está sólo en un lado. La asignación de terminales está bastante bien estandarizada para transistores bipolares: 1 es la base, 2 el emisor y 3 es el colector. (La asignación habitual para los FET es: 1 es el drenador, 2 la fuente y 3 la puerta.)

El encapsulado SOT-89 está diseñado para disipar el calor generado por transistores que operan en el rango de 1 W. Este encapsulado tiene una mayor superficie que el SOT-23, lo que incrementa su habilidad para disipar calor. Algo de calor se disipa por la superficie superior y la mayor parte lo hace en los contactos entre el dispositivo y la placa del circuito al que se conecta. La característica especial de la cápsula del SOT-89, sin embargo, es la lengüeta extra del colector que se extiende en el lado opuesto a los terminales principales. La vista inferior de la Figura 7-20 muestra que los dos terminales de colector son eléctricamente idénticos.

Las asignaciones estándar de los terminales son diferentes para los encapsulados SOT-23 y SOT-89. Los tres terminales localizados en un extremo se numeran en secuencia, de izquierda a derecha viendo desde arriba. El terminal 1 es la base, 2 es el colector (eléctricamente idéntico a la lengüeta grande del extremo opuesto) y 3 es el emisor.

El encapsulado SOT-23 es demasiado pequeño para tener cualquier identificación de partes impresa en él. Normalmente, la única forma de determinar la identificación estándar consiste en ver el número de la parte impreso en la tarjeta y después consultar la lista de partes del circuito. Los encapsulados SOT-89 son suficientemente grandes para alojar códigos de identificación impresos, pero estos códigos raramente son códigos estándar. El procedimiento típico para aprender más acerca de un transistor en un encapsulado SOT-89 es igual que para las configuraciones de los más pequeños SOT-23.

Ocasionalmente un circuito usa encapsulados SOIC, que contienen múltiples transistores. El encapsulado SOIC recuerda a los encapsulados diminutos duales en línea que se usan normalmente para circuitos integrados y la antigua tecnología de tarjetas de circuitos de alimentación pasante. Los terminales en el SOIC, sin embargo, tienen la forma de ala de gaviota que se requiere en la tecnología de montaje superficial.

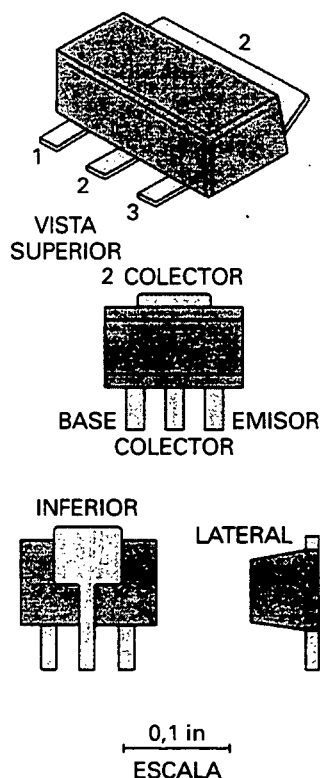


Figura 7-20. El encapsulado SOT-89 está diseñado para disipar el calor generado por los transistores que funcionan en el rango de 1 W.

RESUMEN

Sección 7-1. Variaciones en la ganancia de corriente

La ganancia de corriente de un transistor es una cantidad imprevisible. Debido a las tolerancias de fabricación, la ganancia de corriente de un transistor puede fluctuar en un intervalo de hasta 3:1 cuando se sustituye un transistor por otro del mismo tipo. Los cambios en la temperatura y en la corriente de colector producen variaciones adicionales en la ganancia en continua.

Sección 7-2. La recta de carga

La recta de carga en continua contiene todos los puntos posibles de trabajo para un circuito de transistor. El extremo superior de la recta de carga recibe el nombre de saturación y el extremo inferior se llama corte. El método para hallar la corriente de saturación consiste en pensar en un cortocircuito entre el colector y el emisor. El método para determinar la tensión de corte consiste en imaginar un circuito abierto entre el colector y el emisor.

Sección 7-3. El punto de trabajo

El punto de trabajo de un transistor se localiza sobre la recta de carga en continua. La ubicación exacta de este punto viene determinada por la corriente de colector y por la tensión colector-emisor. Con polarización de base, el punto Q se desplaza cada vez que cambia cualquiera de los valores del circuito.

Sección 7-4. Cómo reconocer la saturación

La idea consiste en suponer que el transistor *npn* está funcionando en la zona activa. Si esta suposición lleva a una contradicción (como una tensión colector-emisor negativa o una corriente de colector mayor que la corriente de saturación), entonces se sabe que el transistor está funcionando en la zona de saturación. Otra forma de reconocer la saturación es comparando la resistencia de base con la resistencia de colector. Si la relación de las resistencias es más o menos de 10:1, es probable que el transistor esté saturado.

Sección 7-5. El transistor en conmutación

La polarización de base se usa preferentemente cuando el transistor trabaja en conmutación. La conmutación se realiza entre el corte y la saturación. Este tipo de funcionamiento tiene aplicaciones útiles en los circuitos digitales. Otro nombre para los circuitos de conmutación es el de circuitos de dos estados.

Sección 7-6. Polarización de emisor

La polarización de emisor es prácticamente inmune a los cambios de la ganancia de corriente. El proceso para analizar la polarización de emisor consiste en hallar la tensión de emisor, la corriente de emisor, la tensión de colector y la tensión colector-emisor. Lo único que se necesita en este proceso es la ley de Ohm.

Sección 7-7. Excitadores para los LED

Para excitar un diodo LED se utiliza un transistor con polarización de base funcionando en las zonas de saturación y de corte para controlar la corriente en el LED. Para excitar un LED con polarización de emisor, el transistor funciona en la zona activa y en la zona de corte a fin de controlar la corriente por el LED.

Sección 7-8. El efecto de pequeños cambios

Tanto para quienes detectan averías como para los que diseñan es útil la capacidad de predecir la variación de una tensión o corriente dependientes cuando cambia uno de los valores del circuito. Si puede hacerlo, puede entender mejor lo que sucede en diferentes averías y puede analizar más fácilmente los circuitos.

Sección 7-9. Detección de averías

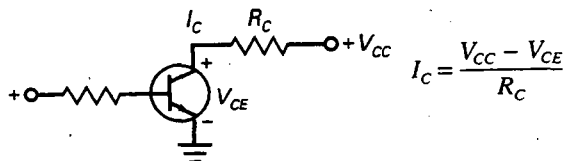
Se puede usar un óhmetro para comprobar un transistor. Los mejores resultados se obtienen si se hace con el transistor desconectado del circuito. Si el transistor aún se encuentra en el circuito y éste está encendido, entonces se pueden medir las tensiones del transistor, que son pistas para posibles fallos.

Sección 7-10. Más dispositivos optoelectrónicos

A causa de su β_{dc} , el fototransistor es más sensible a la luz que el fotodiodo. Combinado con un LED, el fototransistor nos da un optoacoplador más sensible. La desventaja con el fototransistor es que responde más lentamente a los cambios en la intensidad de la luz que un fotodiodo.

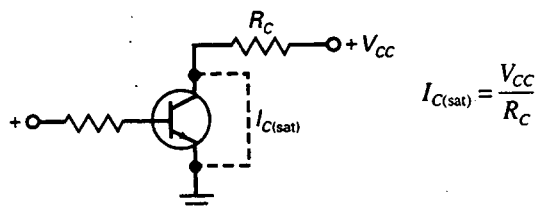
DERIVACIONES

(7-1) Análisis de la recta de carga:

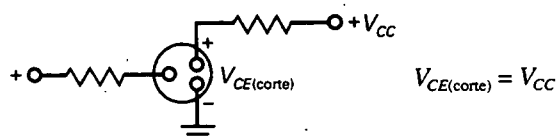


270 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

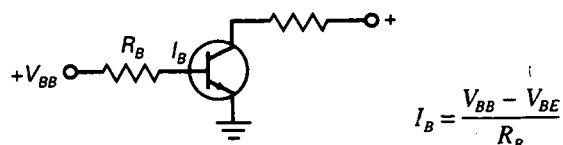
(7-2) Corriente de saturación
(polarización de base):



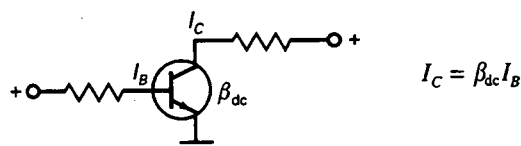
(7-3) Tensión de corte
(polarización de base):



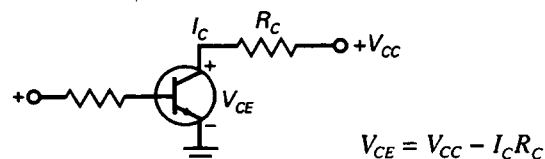
(7-4) Corriente de base:



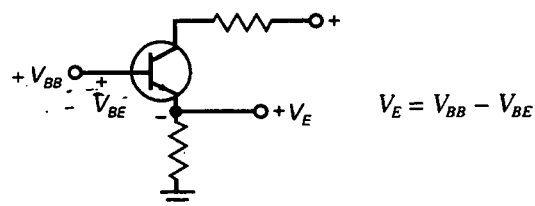
(7-5) Ganancia de corriente:



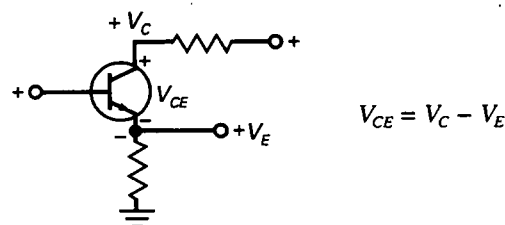
(7-6) Tensión colector-emisor:



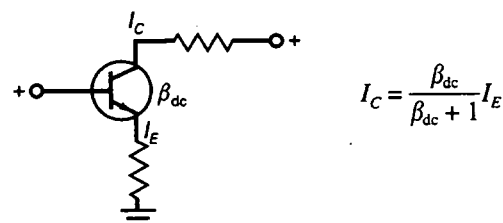
(7-7) Tensión de emisor:



(7-8) Tensión colector-emisor:



(7-9) Insensibilidad de I_C con β_{dc} :



EJERCICIOS PARA EL ALUMNO

CUESTIONES

- La ganancia de corriente de un transistor se define como la relación entre corriente de colector y
 - La corriente de base
 - La corriente de emisor
 - La corriente de la fuente de alimentación
 - La corriente de colector
- La gráfica de la ganancia de corriente en función de la corriente de colector indica que la ganancia de corriente
 - Es constante
 - Varía un poco
 - Varía significativamente
 - Es igual a la corriente de colector dividida entre la corriente de base
- Si la corriente de colector aumenta, ¿qué sucede con la ganancia de corriente?
 - Disminuye
 - No cambia
 - Aumenta
 - Cualquiera de las anteriores
- Al aumentar la temperatura, la ganancia de corriente
 - Disminuye
 - No cambia

- c) Aumenta
 - d) Puede ser cualquiera de las anteriores
5. Si la resistencia de base disminuye, la tensión de colector probablemente
 - a) Disminuya
 - b) No cambie
 - c) Aumente
 - d) Cualquiera de las opciones anteriores
 6. Si la resistencia de base es muy pequeña, el transistor funcionará en la zona:
 - a) De corte
 - b) Activa
 - c) De saturación
 - d) De ruptura
 7. Si se desprecia la resistencia interna del diodo colector, la tensión de saturación colector-emisor es
 - a) 0 V
 - b) Unas décimas de voltio
 - c) 1 V
 - d) Igual a la tensión de la fuente
 8. Sobre una recta de carga se muestran tres puntos Q diferentes. El punto Q superior tiene:
 - a) Mínima ganancia de corriente
 - b) Ganancia de corriente intermedia
 - c) Máxima ganancia de corriente
 - d) La corriente de colector en corte
 9. Si un transistor funciona en la parte central de la recta de carga, un aumento en la resistencia de base hará que el punto Q se mueva
 - a) Hacia abajo
 - b) Hacia arriba
 - c) A ningún otro sitio
 - d) Fuera de la recta de carga
 10. Si el transistor funciona en la parte central de la recta de carga, un aumento en la ganancia de corriente hará que el punto Q se mueva:
 - a) Hacia abajo
 - b) Hacia arriba
 - c) A ningún otro sitio
 - d) Fuera de la recta de carga
 11. Si la tensión de la fuente de base aumenta, el punto Q se mueve:
 - a) Hacia abajo
 - b) Hacia arriba
 - c) A ningún otro sitio
 - d) Fuera de la recta de carga
 12. Suponga que la resistencia de base está abierta. Entonces el punto Q se halla
 - a) En la parte central de la recta de carga
 - b) En el extremo superior de la recta de carga
 - c) En el extremo inferior de la recta de carga
 - d) Fuera de la recta de carga

FUNDAMENTOS DE LOS TRANSISTORES 271

13. Si la tensión de la fuente de polarización de base se desconecta, la tensión colector-emisor será igual a
 - a) 0 V
 - b) 6 V
 - c) 10,5 V
 - d) La tensión de la fuente de colector
14. Si la resistencia de base está en cortocircuito, el transistor probablemente
 - a) Se saturará
 - b) Se pondrá en corte
 - c) Se destruirá
 - d) Ninguna de las anteriores
15. Si la resistencia de colector disminuye a cero en un circuito con polarización de base, la recta de carga será
 - a) Horizontal
 - b) Vertical
 - c) Inútil
 - d) Plana
16. La corriente de colector es de 10 mA. Si la ganancia de corriente es de 100, la corriente de base es
 - a) 1 μ A
 - b) 10 μ A
 - c) 100 μ A
 - d) 1 mA
17. La corriente de base es de 50 μ A. Si la ganancia de corriente es de 125, el valor de la corriente de colector es aproximadamente de
 - a) 40 μ A
 - b) 500 μ A
 - c) 1 mA
 - d) 6 mA
18. Si el punto Q se desplaza a lo largo de la recta de carga, la tensión aumenta cuando la corriente
 - a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) No sucede nada de lo anterior
19. Cuando no hay corriente de base en un transistor conmutador, la tensión de salida del transistor
 - a) Está a nivel bajo
 - b) Está a nivel alto
 - c) Es la misma
 - d) Es desconocida
20. Un circuito en el que la corriente de emisor es constante se llama
 - a) Polarización de base
 - b) Polarización de emisor
 - c) Polarización de transistor
 - d) Polarización con dos fuentes
21. El primer paso para el análisis de los circuitos con polarización de emisor consiste en determinar
 - a) La corriente de base
 - b) La tensión de emisor
 - c) La corriente de emisor
 - d) La corriente de colector
22. Si la ganancia de corriente es desconocida en un circuito con polarización de emisor, lo que no se puede calcular es
 - a) La tensión de emisor

272 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

- b) La corriente de emisor
- c) La corriente de colector
- d) La corriente de base
- 23. Si la resistencia de emisor está abierta, la tensión de colector
 - a) Está a nivel bajo
 - b) Está a nivel alto
 - c) No cambia
 - d) Se desconoce
- 24. Si la resistencia de colector está abierta, la tensión de colector
 - a) Está a nivel bajo
 - b) Está a nivel alto
 - c) No cambia
 - d) Es desconocida
- 25. Si la ganancia de corriente aumenta de 50 a 300 en un circuito con polarización de emisor, entonces la corriente de colector
 - a) Se mantiene casi al mismo valor
 - b) Disminuye por un factor de 6
 - c) Aumenta por un factor de 6
 - d) Es cero
- 26. Si la resistencia de emisor disminuye, la tensión de colector:
 - a) Disminuye
 - b) Se mantiene al mismo valor
 - c) Aumenta
 - d) Hace que el transistor entre en la zona de ruptura
- 27. Si la resistencia de emisor disminuye
 - a) El punto Q sube a lo largo de la recta de carga
 - b) La corriente de colector disminuye
 - c) El punto Q permanece en el mismo lugar
 - d) La ganancia de corriente aumenta

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

1. Dibuje un circuito con polarización de base. Después dígame cómo calcular la tensión colector-emisor. ¿Por qué es fácil que este circuito falle en producción en serie si se necesita un valor preciso de ganancia de corriente?
2. Dibuje otro circuito con polarización de base. Dibuje la recta de carga para el circuito y dígame cómo calcular los puntos de saturación y corte. Comente los efectos producidos por cambiar la ganancia de corriente en la posición del punto Q .
3. ¿Cuál es la diferencia entre polarización de base y polarización de emisor? ¿En qué tipo de circuitos es útil cada uno?
4. Dibuje un circuito con polarización de emisor y dígame cómo funciona. ¿Qué le pasa a la corriente de colector cuando se sustituye el transistor o cambia la temperatura?

5. Dígame como probaría un transistor fuera del circuito. ¿Qué tipo de test puede hacer cuando el transistor está en el circuito con la alimentación conectada?
6. ¿Qué es un optoacoplador y cuáles son sus ventajas? Quiero ver un dibujo del dispositivo y una explicación de su funcionamiento.
7. ¿Qué efecto tiene la temperatura sobre la ganancia de corriente?
8. ¿Cuál es la principal aplicación de un circuito con polarización de base?
9. ¿Qué equipo de medida usa un técnico para una comprobación del transistor?
10. ¿Qué tipo de fallos puede detectar un trazador de curvas?
11. Dibuje un circuito con polarización de base. Ahora explique tres formas de saturar el circuito y muestre los valores.
12. Cuando se detectan averías de un circuito conmutador con un voltímetro, ¿cómo puede decir si el transistor está en corte o saturación?
13. ¿Qué transistor tenderá a saturar más con menos corriente de base: un transistor con una gran R_C o uno con una R_C pequeña?
14. Cuando un transistor con polarización de base se usa como conmutador, ¿qué es lo que hace el transistor?

PROBLEMAS BÁSICOS**Sección 7-1. Variaciones de la ganancia de corriente**

- 7-1. Vea la Figura 7-1. ¿Cuál es la ganancia de corriente de un 2N3904 si la corriente de colector es de 200 mA y la temperatura de la unión es de 25 °C?
- 7-2. Consulte la Figura 7-1. La temperatura de la unión es de 125 °C y la corriente de colector es de 0,1 mA. ¿Cuál es el valor de la ganancia de corriente?

Sección 7-2. La recta de carga

- 7-3. Dibuje la recta de carga para la Figura 7-21a. ¿Cuál es la corriente de colector en el punto de saturación? ¿Y la tensión colector-emisor en el punto de corte?
- 7-4. Si la fuente de tensión de colector se reduce a 10 V en la Figura 7-21a, ¿qué le sucede a la recta de carga?
- 7-5. Si la resistencia de colector se reduce a 1 k Ω en la Figura 7-21a, ¿qué le sucede a la recta de carga?
- 7-6. Si la resistencia de base en la Figura 7-21a se duplica, ¿qué le sucede a la recta de carga?

- 7-7. Dibuje la recta de carga para la Figura 7-21b. ¿Cuál es la corriente de colector en el punto de saturación? ¿Y la tensión colector-emisor en el punto de corte?
- 7-8. Si la tensión de la fuente de colector se duplica en la Figura 7-21b, ¿qué le sucede a la recta de carga?
- 7-9. Si la resistencia de colector aumenta a 1 k Ω en la Figura 7-21b, ¿qué le sucede a la recta de carga?

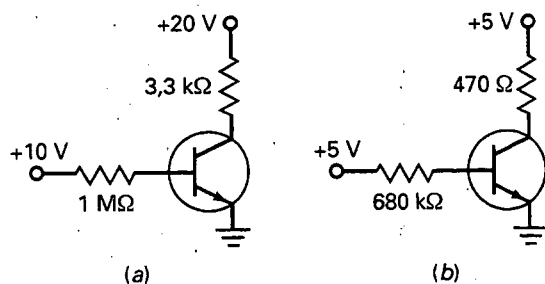


Figura 7-21

- 7-10. En la Figura 7-21a, ¿cuál es la tensión entre el colector y masa si la ganancia de corriente vale 100?
- 7-11. La ganancia de corriente fluctúa entre 25 y 300 en la Figura 7-21a. ¿Cuál es el valor mínimo de la tensión de colector a masa? ¿Y el máximo?
- 7-12. Las resistencias en la Figura 7-21a tienen una tolerancia de ± 5 por 100. Las tensiones de las fuentes tienen una tolerancia de ± 10 por 100. Si la ganancia de corriente puede variar entre 50 y 150, ¿cuál es la mínima tensión posible de colector a masa? ¿Y la máxima?
- 7-13. En la Figura 7-21b, ¿cuál es la tensión entre el colector y masa si la ganancia de corriente vale 100?
- 7-14. La ganancia de corriente varía entre 25 y 300 en la Figura 7-21b. ¿Cuál es la tensión mínima de colector a masa? ¿Y la máxima?
- 7-15. Las resistencias en la Figura 7-21b tienen una tolerancia de ± 5 por 100. Las tensiones de la fuente tienen una tolerancia de ± 10 por 100. Si la ganancia de corriente puede variar de 50 a 150, ¿cuál es el mínimo valor posible de la tensión de colector a masa? ¿Y el valor máximo?

Sección 7-4. Cómo reconocer la saturación

- 7-16. En la Figura 7-21a, emplee los valores dados a menos que se indique otra cosa. Determine si el

transistor está saturado para cada uno de estos casos:

- a) $R_B = 33 \text{ k}\Omega$ y $h_{FE} = 100$
 b) $V_{BB} = 5 \text{ V}$ y $h_{FE} = 200$
 c) $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ y $h_{FE} = 50$
 d) $V_{CC} = 10 \text{ V}$ y $h_{FE} = 100$

- 7-17. En la Figura 7-21b emplee los valores dados a menos que se indique lo contrario. Determine si el transistor está saturado para cada uno de estos casos:

- a) $R_B = 51 \text{ k}\Omega$ y $h_{FE} = 100$
 b) $V_{BB} = 10 \text{ V}$ y $h_{FE} = 500$
 c) $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ y $h_{FE} = 100$
 d) $V_{CC} = 10 \text{ V}$ y $h_{FE} = 100$

Sección 7-5. El transistor en conmutación

- 7-18. La resistencia de 680 k Ω en la Figura 7-21b se sustituye por otra de 4,7 k Ω y un interruptor en serie. Suponiendo que el transistor es ideal, ¿cuál es la tensión de colector si el interruptor está abierto? ¿Cuál es la tensión de colector si el interruptor está cerrado?
- 7-19. Repita el Problema 7-18, pero usando $V_{CE(\text{sat})} = 0,2 \text{ V}$ e $I_{CEO} = 100 \text{ nA}$.

Sección 7-6. Polarización de emisor

- 7-20. ¿Cuál es la tensión de colector en la Figura 7-22a? ¿Y la tensión de emisor?
- 7-21. Si la resistencia de emisor se duplica en la Figura 7-22a, ¿cuál es la tensión colector-emisor?
- 7-22. Si la tensión de la fuente de colector disminuyese a 15 V en la Figura 7-22a, ¿cuál es la tensión de colector?
- 7-23. ¿Cuál es la tensión de colector en la Figura 7-22b si $V_{BB} = 2 \text{ V}$?
- 7-24. Si la resistencia de emisor se duplica en la Figura 7-22b, ¿cuál es la tensión colector-emisor para una tensión de la fuente de base de 2,3 V?
- 7-25. Si la tensión de la fuente de colector aumenta a 15 V en la Figura 7-22b, ¿cuál es la tensión colector-emisor para $V_{BB} = 1,8 \text{ V}$?

Sección 7-7. Excitadores para los LED

- 7-26. Si la tensión de la fuente de base es de 2 V en la Figura 7-22c, ¿cuál es el valor de la corriente por el LED?
- 7-27. Si $V_{BB} = 1,8 \text{ V}$ en la Figura 7-22c, ¿cuál es el valor de la corriente por el LED? ¿Y el valor aproximado de la tensión de colector?

274 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

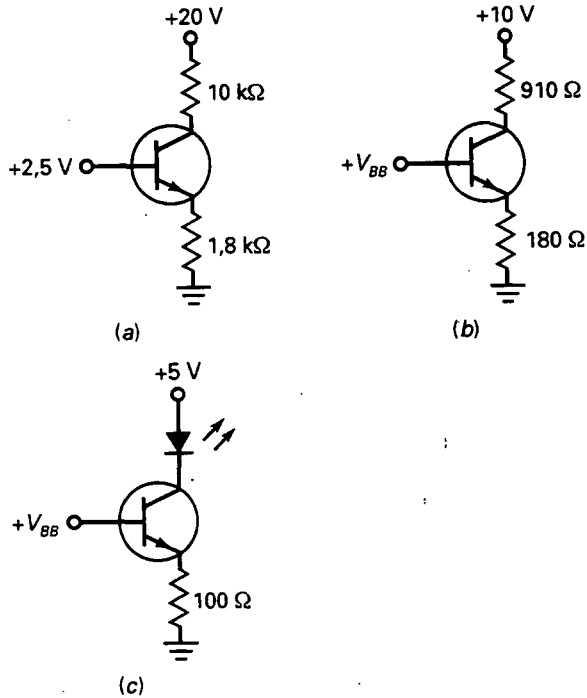


Figura 7-22

Sección 7-8. El efecto de pequeños cambios

Utilice las letras A (aumenta), D (disminuye) y N (no cambia) para sus respuestas a los problemas siguientes.

- 7-28. El valor de la fuente de tensión de base en la Figura 7-23a aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de base, la corriente de colector y la tensión de colector?
- 7-29. La resistencia de base en la Figura 7-23a aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de base, la corriente de colector y la tensión de colector?
- 7-30. La resistencia de colector en la Figura 7-23a aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de base, la corriente de colector y la tensión de colector?
- 7-31. La tensión de la fuente de colector en la Figura 7-23a aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de base, la corriente de colector y la tensión de colector?
- 7-32. La tensión de la fuente de base en la Figura 7-23b aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de base, la corriente de colector y la tensión de colector?
- 7-33. La resistencia de emisor aumenta en un 10 por 100 en la Figura 7-23b. ¿Qué sucede con la corriente de emisor, la corriente de colector y la tensión de colector?

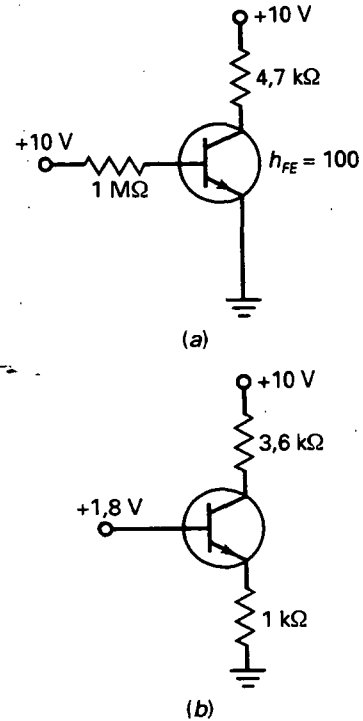


Figura 7-23

- 7-34. La resistencia de colector en la Figura 7-23b aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de emisor, la corriente de colector y la tensión de colector?
- 7-35. La tensión de la fuente de colector en la Figura 7-23b aumenta en un 10 por 100. ¿Qué sucede con la corriente de emisor, la corriente de colector y la tensión de colector?

Sección 7-9. Detección de averías

- 7-36. Un voltímetro indica 10 V en el colector de la Figura 7-23a. ¿Cuáles son algunos de los fallos que podría ocasionar esta lectura tan elevada?
- 7-37. ¿Qué pasa si la masa del emisor está desconectada en la Figura 7-23a? ¿Cuál será la lectura de un voltímetro para la tensión de base? ¿Y para la tensión de colector?
- 7-38. Un voltímetro mide una tensión muy baja en el colector en la Figura 7-23a. ¿Cuáles son algunos de los fallos posibles?
- 7-39. Un voltímetro mide 10 V en el colector en la Figura 7-23b. ¿Cuáles son algunos de los fallos que podría causar esta tensión tan elevada?
- 7-40. ¿Qué pasaría si la resistencia de emisor estuviese abierta en la Figura 7-23b? ¿Qué lectura daría un voltímetro para la tensión de base? ¿Y para la tensión de colector?

- 7-41. Un voltímetro indica 1,1 V en el colector en la Figura 7-23b. ¿Cuáles son algunos fallos posibles?

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 7-42. Suponga conectado el circuito de la Figura 7-23a y que está funcionando normalmente. Ahora su trabajo consiste en destruir el transistor; es decir, se le está pidiendo que halle las formas en las que podría llevarlo a cabo. ¿Qué intentaría hacer?
- 7-43. Un estudiante del primer año de electrónica inventa un nuevo circuito. Funciona muy bien cuando la ganancia de corriente está entre 90 y 110; fuera de este intervalo, falla. El estudiante planea producir en serie el circuito seleccionando uno por uno los transistores 2N3904 que tengan la ganancia de corriente adecuada. El estudiante le pide ayuda. ¿Cuáles son los consejos que podría darle?
- 7-44. Un estudiante jura que puede fabricar un circuito de polarización de base cuya recta de carga no es una línea recta. Apuesta una gran cantidad de dinero a que lo puede hacer. ¿Aceptaría el lector la apuesta? Explique su respuesta.
- 7-45. Un estudiante desea medir la tensión colector-emisor en la Figura 7-23b y, en consecuencia, conecta un voltímetro entre el colector y el emisor. ¿Cuál será la lectura que le da el voltímetro? (Nota: Hay varias respuestas correctas.)
- 7-46. ¿Cuál es la corriente de colector en la Figura 7-24a?
- 7-47. En la Figura 7-24a, el primer transistor tiene una ganancia de corriente de 100, mientras que la ganancia de corriente del segundo transistor es de 50. ¿Cuál es la corriente de base en el primer transistor?
- 7-48. ¿Qué corriente circula por el LED de la Figura 7-24b si $V_{BB} = 0$? ¿Y si $V_{BB} = 10$ V?
- 7-49. El diodo zener en la Figura 7-24b se sustituye por un 1N748. ¿Cuánto vale la corriente por el LED si $V_{BB} = 0$?
- 7-50. ¿Cuál es el máximo valor posible de la corriente en la resistencia de $2\text{ k}\Omega$ de la Figura 7-25a?
- 7-51. La Figura 7-25b se aplica al 4N33 de la Figura 7-25a. Si la tensión en la resistencia de $2\text{ k}\Omega$ es de 2 V, ¿cuál es el valor de V_{BB} ?
- 7-52. En la Figura 7-25a el LED está abierto, y $V_{BB} = 3$ V. Se conecta un voltímetro entre el colector del 2N3904 y tierra. ¿Cuál es la lectura del voltímetro?
- 7-53. Un voltímetro tiene una sensibilidad de $20.000\ \Omega/\text{V}$. El voltímetro se conecta entre el colector y tierra en la Figura 7-21a. Si la resistencia de $3,3\text{ k}\Omega$ está abierta, ¿qué lectura da el voltímetro en su rango de 50 V?

ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES

Emplee la Figura 7-26 en los problemas restantes. Suponga aumentos aproximados del 10 por 100 en cada variable independiente y utilice la segunda aproximación del transistor. Si el cambio en una variable dependiente es tan pequeño que sería difícil detectarlo, la respuesta en ese caso debe ser una N (no hay cambio). Por ejemplo, es muy probable que fuese difícil medir un cambio menor que un 1 por 100. Para un detector de fallos, un cambio como éste es como si prácticamente no existiera ninguno.

- 7-54. Trate de hallar la respuesta de cada una de las variables dependientes en el cuadro titulado V_{BB} . Verifique sus contestaciones. Luego conteste la pregunta siguiente tan simple y claramente como le sea posible. ¿Qué efecto tiene un aumento de la tensión de la fuente de base sobre las variables dependientes del circuito?
- 7-55. Obtenga la respuesta de cada una de las variables dependientes en el cuadro titulado V_{CC} . Verifique sus contestaciones. Luego, con una o dos frases, haga un resumen de los resultados.

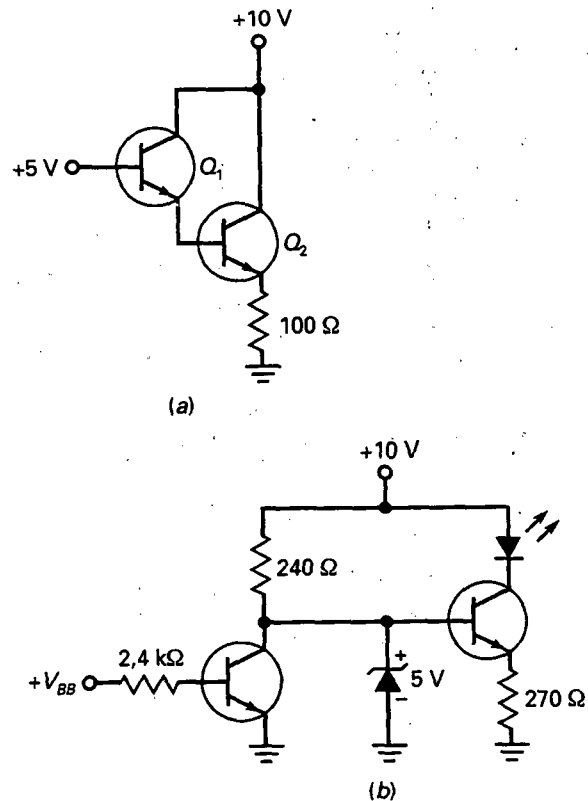


Figura 7-24

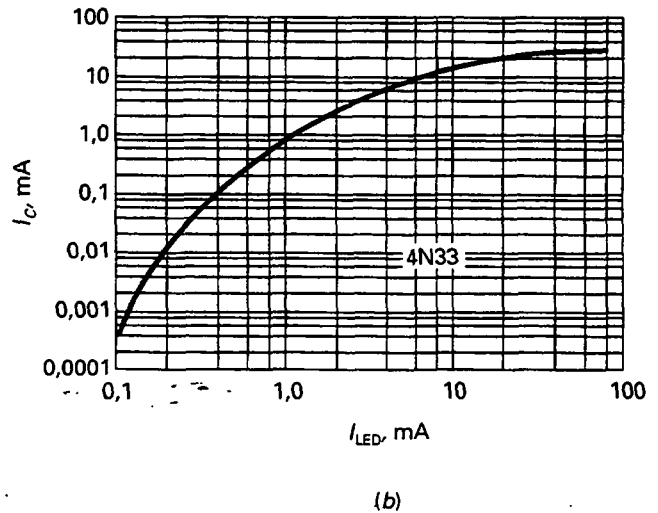
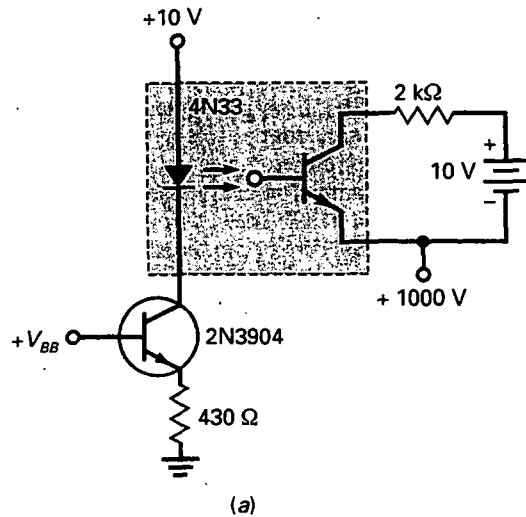
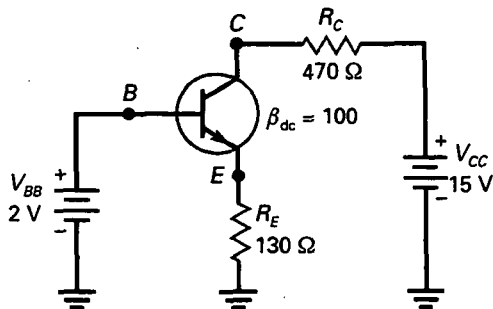


Figura 7-25

7-56. Halle la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_E . Verifique sus contestaciones. Enumere las variables dependientes que disminuyen. Explique por qué disminuyen empleando la ley de Ohm u otros conceptos básicos.

7-57. Deduzca la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_C . Enumere las variables que permanecen sin cambio y explique por qué no muestran cambios.



OK	T1	T2	T3
V_B : C2	V_B : A2	V_B : E1	V_B : D5
V_E : E5	V_E : D5	V_E : A2	V_E : B4
V_C : D4	V_C : A3	V_C : B6	V_C : A6
I_E : D1	I_E : C4	I_E : F5	I_E : C1
I_C : F3	I_C : E3	I_C : B3	I_C : A2
I_B : D6	I_B : C1	I_B : A6	I_B : E3

	1	2	3	4	5	6
A	A	N	A	N	N	D
B	D	A	D	N	D	A
C	N	A	D	N	D	D
D	A	D	D	D	N	A
E	N	N	N	A	A	D
F	D	D	A	D	D	A

RESPUESTAS

Figura 7-26. Análisis de variables dependientes.

8

Polarización de los transistores

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de

- Dibujar un esquema de un circuito de polarización por división de tensión.
- Calcular en un circuito de polarización por división de tensión, la corriente por el divisor, la tensión de base, la tensión de emisor, la corriente de emisor, la tensión de colector y la tensión colector-emisor.
- Obtener la recta de carga y calcular el punto de trabajo (Q) de un circuito de polarización por división de tensión.
- Dibujar un esquema de un circuito de polarización de emisor con dos fuentes de alimentación y calcular V_{RE} , I_E , V_C y V_{CE} .
- Recordar cómo se utilizan los transistores *pnp* en el circuito de polarización por división de tensión.
- Comparar los diferentes tipos de polarización y describir las características de cada uno.

VOCABULARIO

- | | | |
|---|---|-------------------------|
| • autopolización | • polarización con realimentación de emisor | • prototipo |
| • divisor de tensión casi constante | • polarización de emisor con dos fuentes | • punto Q |
| • divisor de tensión constante | • polarización por división de tensión | • transistor <i>pnp</i> |
| • etapa | | |
| • polarización con realimentación de colector | | |

Un prototipo es un circuito básico que un diseñador puede modificar para obtener circuitos más avanzados. La polarización de base de un transistor es un prototipo empleado en el diseño de circuitos digitales, mientras que la de un emisor es usado en el diseño de amplificadores. En este capítulo se hará hincapié en la polarización de emisor y en los importantes circuitos derivados de ésta.

8-1. POLARIZACIÓN POR DIVISOR DE TENSIÓN

La Figura 8-1 muestra el circuito de polarización más extensamente utilizado. Obsérvese que el circuito de la base tiene un divisor de voltaje (R_1 y R_2) y, por eso, el circuito se llama *polarización por división de tensión*.

□ Análisis simplificado

Para la detección de averías y los análisis preliminares, se usará el siguiente método: en todos los circuitos de polarización por división de tensión bien

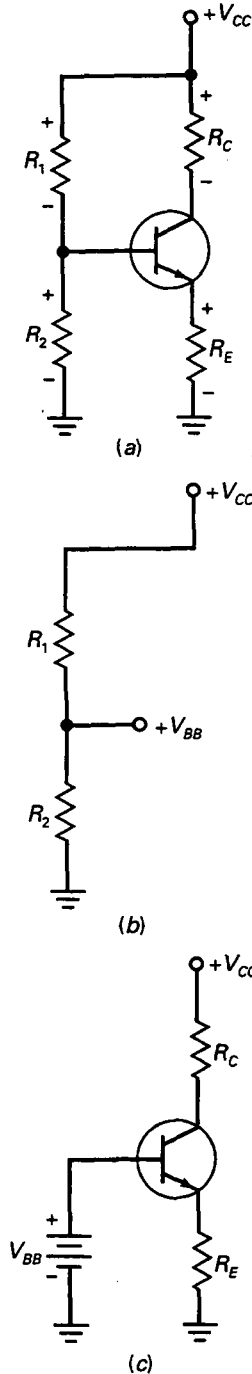


Figura 8-1. Polarización por división de tensión. a) Circuito; b) divisor de tensión; c) circuito simplificado.

diseñados, la corriente de base es mucho menor que la corriente que atraviesa el divisor de tensión. Como la corriente de base tiene un efecto despreciable en el divisor de tensión, podemos abrir mentalmente la conexión entre el divisor de tensión y la base para conseguir el circuito equivalente de la Figura 8-1b. En este circuito, la tensión de salida del divisor es la siguiente:

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

Idealmente, ésta es la fuente de tensión en la base, como muestra la Figura 8-1c.

Como puede apreciarse, la polarización por división de tensión es realmente una polarización de emisor enmascarada; es decir, la Figura 8-1c es equivalente al circuito de la Figura 8-1a, de ahí que la polarización por división de tensión mantenga un valor fijo de corriente de emisor, dando lugar a la independencia del punto Q frente a la ganancia de corriente.

Existe un error en esta aproximación simplificada, que discutiremos en la próxima sección. El punto crucial es el siguiente: en cualquier circuito bien diseñado, el error al usar la Figura 8-1c es muy pequeño. Por ello, un diseñador escoge deliberadamente valores de circuito para que la Figura 8-1a actúe como la Figura 8-1c.

□ Conclusión

Después de calcular V_{BB} , el resto del análisis es el mismo que el visto anteriormente de polarización de emisor en el Capítulo 7. Éste es un resumen de las ecuaciones que puede utilizar para el análisis de una polarización por divisor de tensión:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad (8-1)$$

$$V_E = V_{BB} - V_{BE} \quad (8-2)$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad (8-3)$$

$$I_C \approx I_E \quad (8-4)$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (8-5)$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (8-6)$$

Estas ecuaciones están basadas en las leyes de Ohm y Kirchhoff. Los pasos del análisis son:

1. Calcular la tensión en la base V_{BB} a través del divisor de tensión.
2. Restar 0,7 V para conseguir la tensión de emisor (0,3 para el germanio).
3. Dividir por la resistencia de emisor para obtener la corriente de emisor.

4. Suponer que la corriente de colector es aproximadamente igual a la corriente de emisor.
5. Hallar la tensión de colector a tierra restando la tensión a través de la resistencia de colector a la tensión de alimentación del colector.
6. Calcular la tensión emisor-colector restándole la tensión de emisor a la de colector.

Ya que estos seis pasos son lógicos, serán fáciles de recordar. Después de analizar unos cuantos circuitos de polarización por divisor de tensión, el proceso comenzará a ser automático.

EJEMPLO 8-1

¿Cuál es la tensión entre colector-emisor en el circuito de la Figura 8-2?

SOLUCIÓN

La tensión en la base producida por el divisor de tensión es:

$$V_{BB} = \frac{2,2 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} 10 \text{ V} = 1,8 \text{ V}$$

Restando 0,7 V obtenemos:

$$V_E = 1,8 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 1,1 \text{ V}$$

La corriente de emisor vale:

$$I_E = \frac{1,1 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,1 \text{ mA}$$

Ya que la corriente de colector es aproximadamente igual a la de emisor, podemos calcular la tensión de colector a tierra como:

$$V_C = 10 \text{ V} - (1,1 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 6,04 \text{ V}$$

La tensión colector-emisor vale:

$$V_{CE} = 6,04 - 1,1 \text{ V} = 4,94 \text{ V}$$

Aquí aparece una cuestión importante: el cálculo en este análisis preliminar no depende de cambios en el transistor, el colector de corriente o la temperatura. Por tanto, el punto Q de este circuito se mantiene estable, casi como una roca.

EJEMPLO 8-2

Discutir el significado de la Figura 8-3, que muestra un análisis realizado con un programa de simulación (*Electronics Workbench, EWB*) en el mismo circuito del ejemplo anterior.

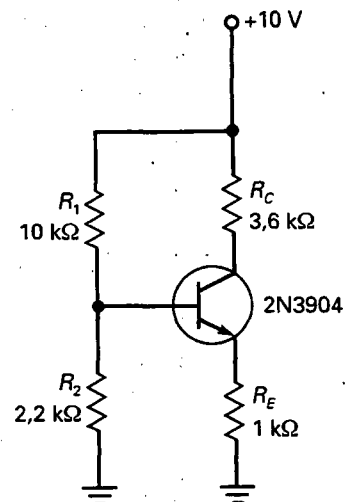


Figura 8-2. Ejemplo.

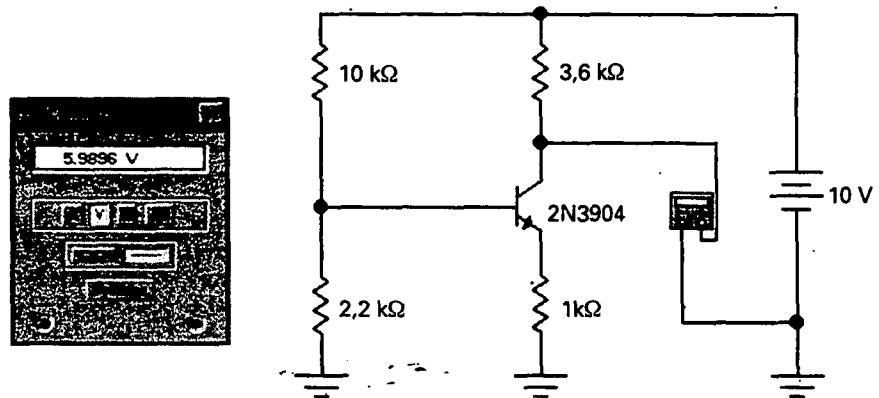


Figura 8-3. Ejemplo EWB.

SOLUCIÓN

Esto nos conduce al punto de partida. Tenemos casi una idéntica respuesta usando un aparato de medida electrónica para analizar el circuito. Como puede ver, el voltímetro marca 5.99 V (redondeando a dos decimales). Compare esto con los 6.04 V en el ejemplo anterior, y verá que hemos llegado esencialmente al mismo resultado.

Podemos esperar este tipo de resultados próximos cuando un circuito de polarización por división de tensión ha sido bien diseñado. Después de todo, la polarización por división de tensión está actuando como una polarización de emisor, con lo que desaparecen los efectos de cambios en el transistor, corriente de colector o temperatura.

8-2. ANÁLISIS EXACTO DE LA POLARIZACIÓN POR DIVISIÓN DE TENSIÓN

¿Qué es un circuito bien diseñado? Es aquel en el que *el divisor de tensión se mantiene constante a la entrada de la resistencia de base*; dicha afirmación requiere una discusión.

□ Resistencia de la fuente

En el Capítulo 1 introdujimos la idea de fuente de tensión constante:

$$\text{Fuente de tensión constante: } R_s < 0,01R_L$$

Si esta condición se cumple, la tensión en la carga se encuentra dentro del 1 por 100 de la tensión de salida sin carga. Ahora extenderemos esta idea al divisor de tensión.

¿Cuál es la resistencia Thevenin del divisor de tensión de la Figura 8-4a? Fijándonos en el divisor de tensión con V_{CC} a tierra, veremos R_1 en paralelo con R_2 . Como una ecuación:

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$

A causa de esta resistencia, la tensión de salida del divisor de tensión no es ideal. Un análisis más exacto incluye la resistencia Thevenin, como muestra la Figura 8-4b. La corriente a través de esta resistencia Thevenin reduce la tensión en la base del valor ideal V_{BB} .

□ Resistencia de carga

¿Cuánto disminuye la tensión en la carga con respecto a la ideal? El divisor de tensión suministró la corriente de base en la Figura 8-4b. Dicho de otro modo, el divisor de tensión ve una resistencia de carga R_{IN} , como se muestra en la Figura 8-4c. Para que el divisor de tensión permanezca constante en la base, la regla 100:1 se tiene que cumplir:

$$R_S < 0,01R_L$$

que se transforma en:

$$R_1 \parallel R_2 < 0,01R_{IN} \quad (8-7)$$

Un circuito de polarización por división de tensión bien diseñado satisface esta condición.

□ Divisor de tensión constante

Si el transistor de la Figura 8-4c tiene una ganancia de corriente de 100, su corriente de colector es 100 veces mayor que la corriente de base, lo que implica que la corriente de emisor es también 100 veces mayor que la corriente de base. Cuando miramos desde la base del transistor, la resistencia de emisor R_E parece ser 100 veces mayor. De esto resulta:

$$R_{IN} = \beta_{ac}R_E \quad (8-8)$$

Por tanto, la Ecuación (8-7) se puede escribir como:

$$\text{Divisor de tensión constante: } R_1 \parallel R_2 < 0,01\beta_{ac}R_E \quad (8-9)$$

Siempre que sea posible, un diseñador seleccionará unos valores en el circuito que satisfagan la regla 100:1 porque obtendrá un punto Q muy estable.

□ Divisor de tensión prácticamente constante

A veces, el diseño de un divisor de tensión constante requiere valores tan pequeños para R_1 y R_2 que ocasiona la aparición de otro tipo de problemas

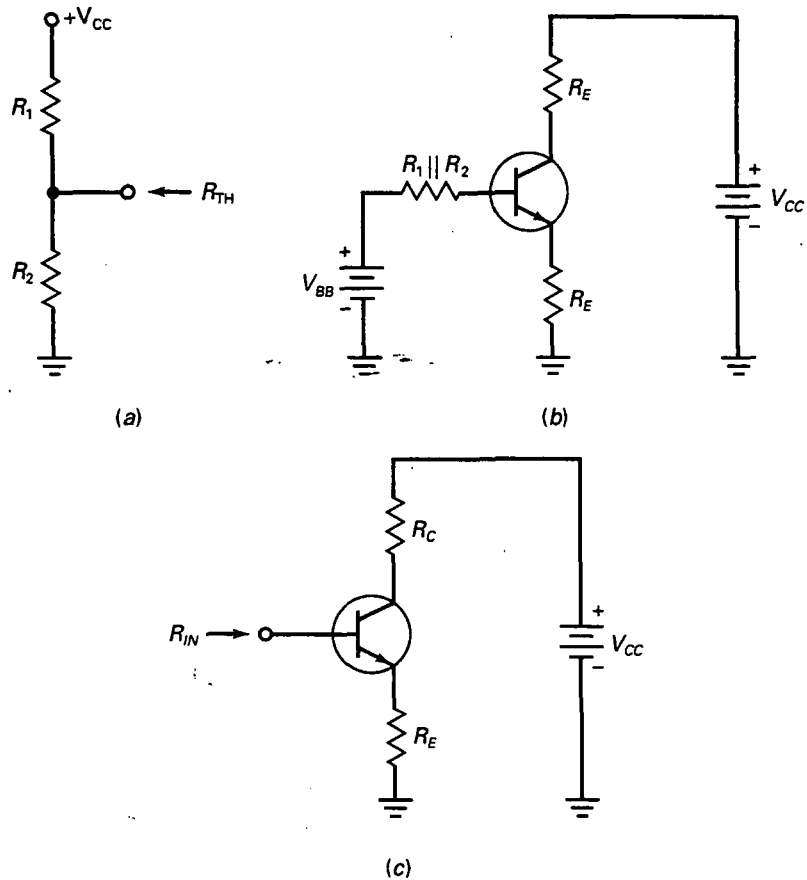


Figura 8-4. a) Resistencia Thevenin; b) circuito equivalente; c) resistencia de entrada de base.

(que se verán más adelante). En tal caso, muchos diseñadores llegan al compromiso de aplicar esta condición:

$$\text{Divisor de tensión prácticamente constante: } R_1 \parallel R_2 < 0,1 \beta_{dc} R_E \quad (8-10)$$

En el peor de los casos, satisfacer esta regla implica que la corriente de colector será aproximadamente un 10 por 100 menor que el valor ideal. Esto es aceptable en muchas aplicaciones porque el circuito de polarización por división de tensión tiene un punto Q razonablemente estable.

□ Una aproximación más cercana

Si se quiere un resultado más exacto para la corriente de emisor, se puede usar la siguiente expresión:

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + (R_1 \parallel R_2) / \beta_{dc}} \quad (8-11)$$

Ésta se diferencia de la de tensión constante en el valor $(R_1 \parallel R_2)/\beta_{dc}$ en el denominador. Como este término se aproxima a cero, la ecuación se simplifica a la del valor constante.

La Ecuación (8-11) mejorará el análisis, pero es bastante complicada. Si se tiene un ordenador y se necesita obtener un análisis más preciso, puede emplearse el EWB o un simulador de circuitos equivalente.

EJEMPLO 8-3

¿Es constante el divisor de tensión de la Figura 8-5? Calcular el valor más exacto de corriente de emisor utilizando la Ecuación (8-11).

SOLUCIÓN

Comprobemos si la regla 100 : 1 se está usando:

Divisor de tensión constante: $R_1 \parallel R_2 < 0,01 \beta_{dc} R_E$

La resistencia Thevenin equivalente del divisor de tensión es:

$$R_1 \parallel R_2 = 10 \text{ k}\Omega \parallel 2,2 \text{ k}\Omega = \frac{(10 \text{ k}\Omega)(2,2 \text{ k}\Omega)}{10 \text{ k}\Omega + 2,2 \text{ k}\Omega} = 1,8 \text{ k}\Omega$$

La resistencia de entrada de la base:

$$\beta_{dc} R_E = (200)(1 \text{ k}\Omega) = 200 \text{ k}\Omega$$

y la centésima parte de esto es:

$$0,01 \beta_{dc} R_E = 2 \text{ k}\Omega$$

Ya que 1,8 k Ω es menor que 2 k Ω , el divisor de tensión es constante.

Con la Ecuación (8-11), la corriente de emisor vale:

$$I_E = \frac{1,8 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega + (1,8 \text{ k}\Omega)/200} = \frac{1,1 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega + 9 \Omega} = 1,09 \text{ mA}$$

lo que está muy cercano a 1,1 mA, valor que habíamos conseguido con el análisis simplificado.

El planteamiento es el siguiente: no tenemos que usar la Ecuación (8-11) para calcular la corriente de emisor cuando el divisor de tensión es constante. Incluso cuando el divisor de tensión es prácticamente constante, el uso de la Ecuación (8-11) provocará cálculos de corriente de emisor sólo con un 10 por 100 de error. A menos que se indique otra cosa, utilizaremos el método simplificado para el análisis de la polarización por divisor de tensión.

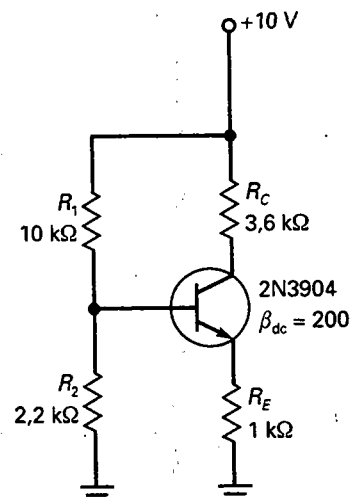


Figura 8-5. Ejemplo.

8-3. RECTA DE CARGA Y PUNTO Q PARA EL CIRCUITO DE POLARIZACIÓN POR DIVISIÓN DE TENSIÓN

A causa del divisor de tensión constante de la Figura 8-6, la tensión de emisor se mantiene constante a 1,1 V. Este dato se debe tener en cuenta en la exposición que se hace a continuación.

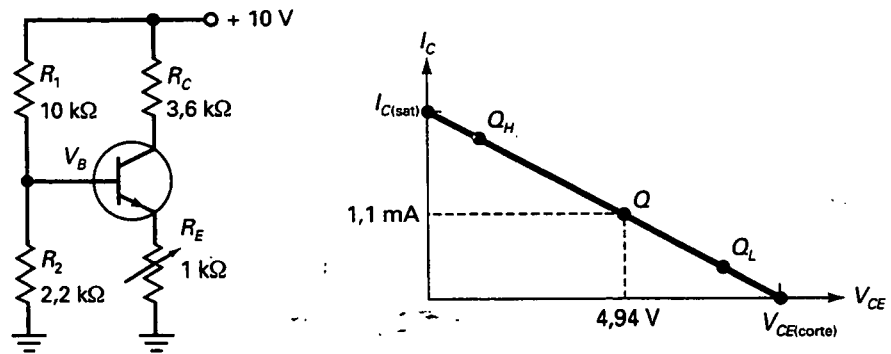


Figura 8-6. Calculando el punto Q .

□ El punto Q

En la Sección 8-1 se calculó el punto Q . A éste le corresponde una corriente de colector de $1,1\text{ mA}$ y una tensión colector-emisor de $4,94\text{ V}$. Estos valores se han dibujado para obtener el punto Q mostrado en la Figura 8-6. Como la polarización a través de un divisor de tensión se deriva de la polarización de emisor, el punto Q es prácticamente inmune a los cambios en la ganancia de corriente. Una forma de moverlo sobre la recta de carga consiste en variar la resistencia de emisor.

Por ejemplo, si la resistencia de emisor vale $2,2\text{ k}\Omega$, la corriente de colector disminuye a:

$$I_E = \frac{1,1\text{ V}}{2,2\text{ k}\Omega} = 0,5\text{ mA}$$

El cambio de tensión es:

$$V_C = 10\text{ V} - (0,5\text{ mA})(3,6\text{ k}\Omega) = 8,2\text{ V}$$

y

$$V_{CE} = 8,2\text{ V} - 1,1\text{ V} = 7,1\text{ V}$$

Por tanto, las nuevas coordenadas del punto Q serán las de Q_L , $0,5\text{ mA}$ y $7,1\text{ V}$.

Por otra parte, si se disminuye la resistencia de emisor a $510\text{ }\Omega$, la corriente de emisor aumenta a:

$$I_E = \frac{1,1\text{ V}}{510\text{ }\Omega} = 2,15\text{ mA}$$

y las tensiones cambian a:

$$V_C = 10 \text{ V} - (2,15 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 2,26 \text{ V}$$

y

$$V_{CE} = 2,26 \text{ V} - 1,1 \text{ V} = 1,16 \text{ V}$$

En esta ocasión, el punto Q se eleva por la recta de carga a una nueva posición Q_H de coordenadas 2,15 mA y 1,16 V.

□ Punto Q en el centro de la recta de carga

V_{CC} , R_1 , R_2 y R_E controlan la corriente de saturación y la tensión de corte. Un cambio en cualquiera de estas variables provocará una variación de $I_{C(sat)}$ y/o $V_{CE(corte)}$. Una vez que el diseñador ha establecido los valores de las variables precedentes, emplea la resistencia de emisor para situar el punto Q en cualquier posición a lo largo de la recta de carga. Si R_E es demasiado grande, el punto Q se desplazará hacia el punto de corte. Si R_E es excesivamente pequeña, Q se desplazará hacia la saturación. Algunos diseñadores prefieren colocar a Q en la parte central de la recta de carga.

8-4. POLARIZACIÓN DE EMISOR CON DOS FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Algunos equipos electrónicos tienen una fuente de alimentación que produce tensiones positivas y negativas. Por ejemplo, en la Figura 8-7 se muestra un circuito con dos fuentes de alimentación: +10 V y -2 V. La fuente negativa polariza directamente el diodo emisor y la positiva lo hace con el diodo colector. Este circuito se deriva del circuito de polarización de emisor, por lo que nos referimos a él simplemente como de polarización de emisor con dos fuentes.

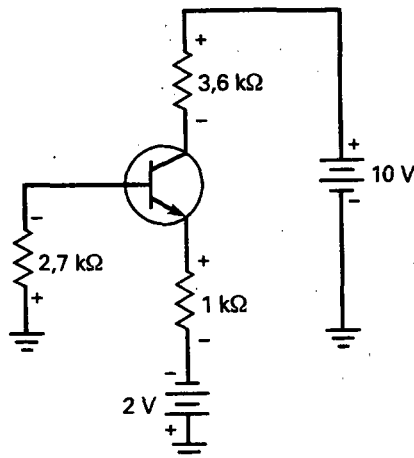


Figura 8-7. Polarización de emisor con dos fuentes de alimentación.

□ Análisis

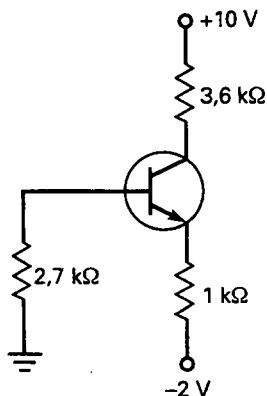


Figura 8-8. Circuito de polarización de emisor con dos fuentes de alimentación, redibujado.

Lo primero que hay que hacer es dibujar de nuevo el circuito como aparece habitualmente en los esquemas. Ello implica que se han de borrar los símbolos de batería, como se muestra en la Figura 8-8, hecho que resulta necesario en los esquemas porque, por lo general, no aparecen símbolos de batería en aquellos que son complicados. Toda la información sigue estando en el circuito, sólo que en forma condensada; es decir, hay una tensión de polarización de -2 V aplicada a la parte inferior de la resistencia de $1\text{ k}\Omega$ y una tensión de polarización de $+10\text{ V}$ aplicada a la parte superior de la resistencia de $3,6\text{ k}\Omega$.

Cuando este tipo de circuitos está diseñado correctamente, la corriente de base será suficientemente pequeña como para ser ignorada, lo que equivale a decir que la tensión de base es de 0 V aproximadamente, como se ve en la Figura 8-9.

La tensión en el diodo emisor es de $0,7\text{ V}$ y por eso aparece $-0,7\text{ V}$ en el emisor. Hay una caída de más a menos de $0,7\text{ V}$ al ir de la base al emisor. Si la tensión de base es de 0 V , la tensión de emisor no puede ser de $+0,7\text{ V}$, sino de $-0,7\text{ V}$.

En la Figura 8-9, la resistencia de emisor, nuevamente, desempeña el papel clave a la hora de establecer la corriente de emisor. Para hallar esta corriente, se aplica la ley de Ohm a la resistencia de emisor como sigue: la parte superior de la resistencia de emisor tiene una tensión de $-0,7\text{ V}$ y la parte inferior de -2 V . Por tanto, la tensión en la resistencia de emisor es igual a la diferencia entre estas dos tensiones. Para llegar a la respuesta correcta, se resta el valor más negativo del valor más positivo. En este caso, el valor más negativo es -2 ; por lo que:

$$V_{RE} = -0,7\text{ V} - (-2\text{ V}) = 1,3\text{ V}$$

Una vez calculada la tensión en la resistencia de emisor, se calcula la corriente de emisor con ayuda de la ley de Ohm:

$$I_E = \frac{1,3\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 1,3\text{ mA}$$

Esta corriente circula a través de la resistencia de $3,6\text{ k}\Omega$ produciendo una caída de tensión que se resta de $+10\text{ V}$, como se indica a continuación:

$$V_C = 10\text{ V} - (1,3\text{ mA})(3,6\text{ k}\Omega) = 5,32\text{ V}$$

La tensión colector-emisor es la diferencia entre la tensión de colector y la tensión del emisor:

$$V_{CE} = 5,32\text{ V} - (-0,7\text{ V}) = 6,02\text{ V}$$

Cuando un circuito de polarización de emisor con dos fuentes de alimentación está bien diseñado, su tensión es similar a la de polarización por división de tensión, cumpliendo la regla de $100:1$, tenemos:

$$R_B < 0,01\beta_{dc}R_E \quad (8-12)$$

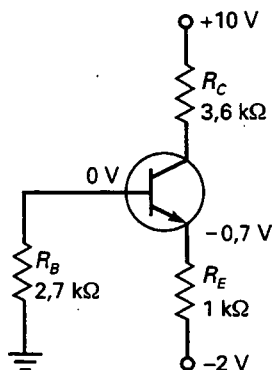


Figura 8-9. La tensión de base es idealmente 0.

En este caso, se simplifican las ecuaciones para el análisis:

$$V_B \approx 0 \quad (8-13)$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - 0,7 \text{ V}}{R_E} \quad (8-14)$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (8-15)$$

$$V_{CE} = V_C + 0,7 \text{ V} \quad (8-16)$$

□ Tensión de base

Una fuente de error en este cálculo simplificado es la pequeña tensión a través de la resistencia de base de la Figura 8-9. Si una pequeña corriente circula por esta resistencia, existirá una tensión negativa entre la base y tierra. En un circuito bien diseñado, esta tensión de base es menor de $-0,1 \text{ V}$. Si el diseñador tiene que usar una resistencia grande, la tensión puede ser más negativa que $-0,1 \text{ V}$. Si tiene problemas con un circuito como éste, la tensión de base a tierra puede producir lecturas erróneas; es decir, algo falla en este circuito.

EJEMPLO 8-4

¿Cuál es la tensión de colector en el circuito de la Figura 8-9, si la resistencia de emisor aumenta a $1,8 \text{ k}\Omega$?

SOLUCIÓN

La tensión a través de la resistencia de emisor se mantiene a $1,3 \text{ V}$. La corriente de emisor vale:

$$I_E = \frac{1,3 \text{ V}}{1,8 \text{ k}\Omega} = 0,722 \text{ mA}$$

La tensión de colector es:

$$V_C = 10 \text{ V} - (0,722 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 7,4 \text{ V}$$

EJEMPLO 8-5

Una etapa es un transistor y todos los componentes pasivos conectados a él. La Figura 8-10 muestra un circuito de tres etapas con una polarización de emisor con dos fuentes de alimentación. ¿Cuál es la tensión de colector a tierra para cada etapa?

SOLUCIÓN

Para empezar, ignoraremos los condensadores porque son como circuitos abiertos para tensiones y corrientes continuas. Entonces, trabajamos con tres transistores aislados, cada uno polarizado con dos fuentes de alimentación.

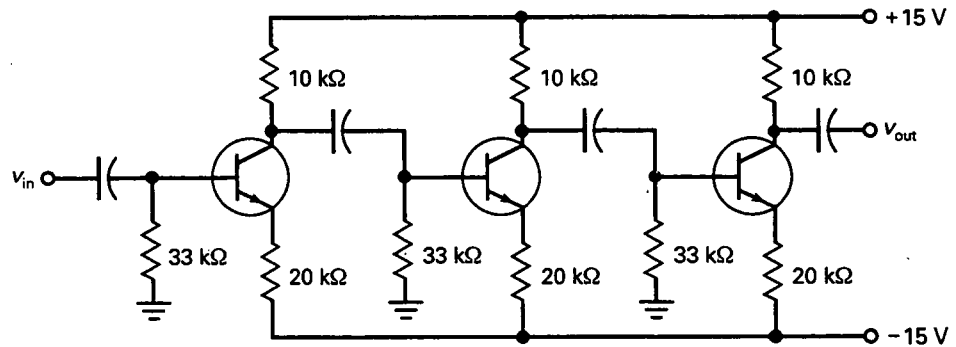


Figura 8-10. Circuito de tres etapas.

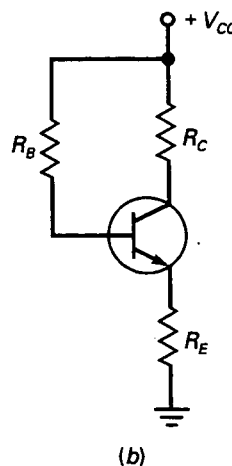
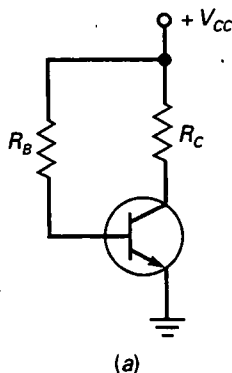


Figura 8-11.
 a) Polarización de base;
 b) polarización con realimentación de emisor.

La primera etapa tiene una corriente de emisor de:

$$I_E = \frac{15\text{ V} - 0.7\text{ V}}{20\text{ k}\Omega} = \frac{14.3\text{ V}}{20\text{ k}\Omega} = 0.715\text{ mA}$$

y una tensión de colector cuyo valor es:

$$V_C = 15\text{ V} - (0.715\text{ mA})(10\text{ k}\Omega) = 7.85\text{ V}$$

Las otras etapas poseen los mismos valores para el circuito, por lo que la tensión de colector a tierra es aproximadamente 7.85 V.

8-5. OTROS TIPOS DE POLARIZACIÓN

En esta sección final se examinarán algunos tipos diferentes de polarización. No se requiere un análisis detallado de los mismos, pues su uso es poco frecuente; no obstante, el usuario debe saber que existen, por si los llegase a encontrar en un circuito.

□ Polarización con realimentación de emisor

Recordemos nuestra discusión sobre la polarización de base (Fig. 8-11a). El circuito representado en dicha figura es el peor cuando se trata de fijar el punto Q . La razón es que en la zona activa la corriente de colector es muy sensible a la ganancia de corriente. En un circuito como éste, el punto Q se desplaza a lo largo de toda la línea de carga con cambios de transistor o de temperatura.

El primer intento de estabilizar el punto Q fue la polarización con realimentación de emisor, mostrada en la Figura 8-11b, y consiste en introducir una resistencia de emisor. El proceso de razonamiento es el siguiente: si I_C aumenta, V_E crece y lo hace también V_B . Mayor V_B significa menor tensión a

través de R_B , con lo que disminuye I_B , en contraposición al aumento de I_C . Se llama realimentación porque el cambio de tensión de emisor alimenta hacia atrás el circuito de base. También se denomina negativa porque se opone al cambio original de corriente de colector.

La polarización con realimentación de emisor nunca llegó a ser popular. El desplazamiento del punto Q es todavía grande para la mayoría de aplicaciones de fabricación masiva. Éstas son las ecuaciones de análisis de la polarización con realimentación de emisor:

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta_{dc}} \quad (8-17)$$

$$V_E = I_E R_E \quad (8-18)$$

$$V_B = V_E + 0,7 \text{ V} \quad (8-19)$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (8-20)$$

La finalidad de la polarización con realimentación de emisor es anular las variaciones de β_{dc} ; ello equivale a que R_E sea mucho mayor que R_B/β_{dc} . Si se cumple esta condición, la Ecuación (8-17) será insensible a cambios de β_{dc} . No obstante, en los circuitos prácticos, R_E no puede ser lo suficientemente grande para anular los efectos de β_{dc} sin que se provoque la saturación del transistor.

La Figura 8-12a muestra un circuito de polarización con realimentación de emisor. En la Figura 8-12b se indica su recta de carga para continua y los puntos de trabajo para dos ganancias de corriente distintas. Como se puede ver, una variación 3:1 en la ganancia de corriente produce un gran cambio en la corriente de colector. Este circuito no es mucho mejor que el de polarización de base.

□ Polarización con realimentación de colector

La Figura 8-13a muestra la *polarización con realimentación de colector* (también llamada *autopolarización*). Históricamente, éste fue otro intento de estabilizar el punto Q empleando realimentación negativa en la base para,

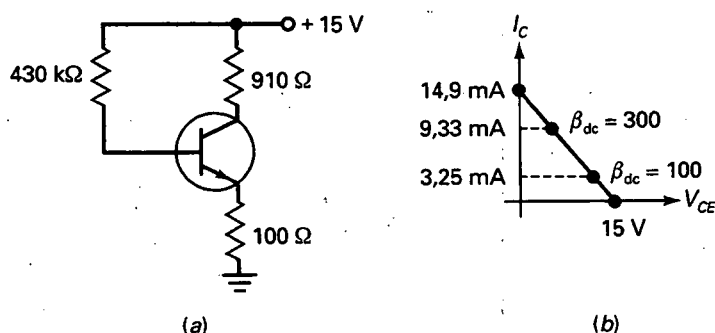


Figura 8-12. a) Ejemplo de polarización con realimentación de emisor; b) el punto Q es sensible a los cambios de ganancia de corriente.

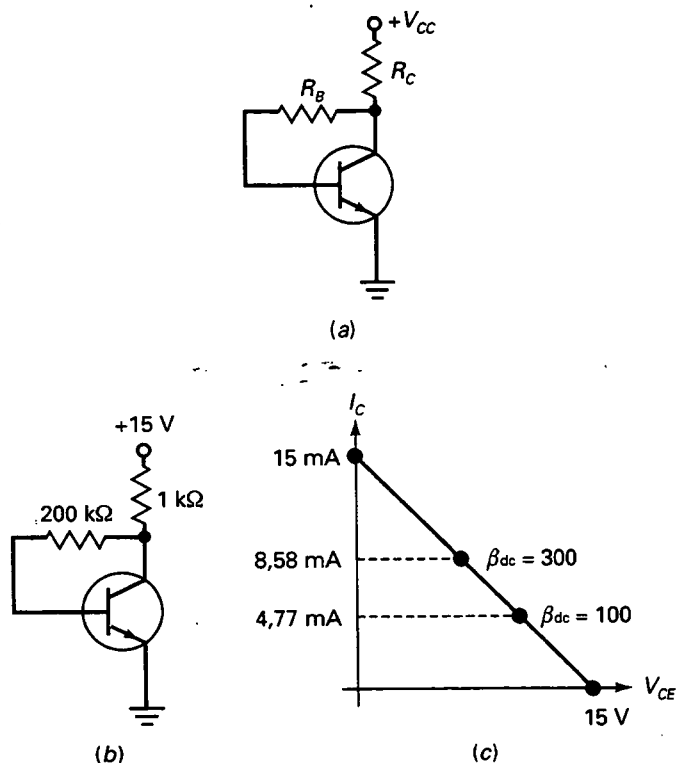


Figura 8-13. a) Polarización con realimentación de colector; b) ejemplo; c) el punto Q es menos sensible a los cambios de ganancia de corriente.

en este caso, neutralizar los cambios de corriente en el colector. Por ejemplo, imaginemos que aumenta la corriente de colector. Esto hace decrecer la tensión de colector, con lo que desciende la tensión en la resistencia de base. Por tanto, disminuirá la corriente de base, lo cual se opone al inicial cambio de corriente en el colector.

Como en la polarización con realimentación de emisor, la polarización con realimentación de colector utiliza realimentación negativa en un intento por reducir el cambio inicial de corriente en el colector. A continuación están las ecuaciones para su análisis:

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B/\beta_{dc}} \quad (8-21)$$

$$V_B = 0,7\text{ V} \quad (8-22)$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (8-23)$$

El punto Q está normalmente cerca de la mitad de la línea de carga, para lo que se requiere una resistencia de base de:

$$R_B = \beta_{dc} R_C \quad (8-24)$$

En la Figura 8-13b se observa un circuito polarizado con realimentación de colector. En la Figura 8-13c aparece su recta de carga para continua y los puntos de trabajo para dos ganancias de corrientes diferentes. Como se puede ver en dicha figura, una variación 3 : 1 en la ganancia de corriente produce menos variación en la corriente de colector que la que permite la polarización con realimentación de emisor (Fig. 8-12b).

La polarización con realimentación de colector es más efectiva que la polarización con realimentación de emisor para estabilizar el punto Q . Aunque el circuito es todavía sensible a los cambios de ganancia de corriente, se utiliza en la práctica dada su sencillez.

❑ Polarizaciones con realimentación de colector y de emisor

Las polarizaciones con realimentación de emisor y de colector representan los primeros esfuerzos por obtener polarizaciones más estables para los circuitos con transistores. A pesar de que la idea de la realimentación negativa es buena, esos circuitos se quedan a mitad de camino al no proporcionar la suficiente realimentación negativa para lograr su objetivo. Por ello, el paso siguiente en la polarización es el circuito que se ve en la Figura 8-14. La idea básica es usar una combinación de una resistencia de emisor y una resistencia de colector.

Como se verá, más cantidad no siempre significa más calidad. En este caso, la combinación de los dos tipos de realimentación en un circuito es de cierta ayuda, pero ésta sigue siendo insuficiente para los niveles necesarios en la producción en serie.

Si el lector tuviese que analizar este circuito, debería emplear las ecuaciones siguientes:

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_E + R_B/\beta_{dc}} \quad (8-25)$$

$$V_E = I_E R_E \quad (8-26)$$

$$V_B = V_E + 0,7 \text{ V} \quad (8-27)$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (8-28)$$

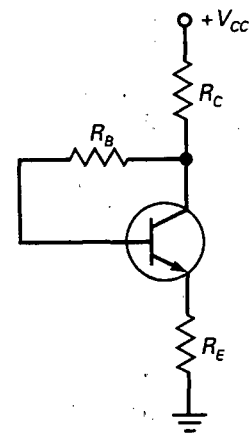


Figura 8-14. Polarización con realimentación de colector y con realimentación de emisor.

8-6. DETECCIÓN DE AVERÍAS

A continuación estudiaremos la detección de averías para la polarización por divisor de tensión, ya que es el método de polarización más empleado. La Figura 8-15 muestra el circuito de polarización por divisor de tensión analizado anteriormente. La Tabla 8-1 muestra las tensiones del circuito cuando hacemos simulaciones con el EWB.

El voltímetro usado tiene una resistencia de entrada de 10 M Ω .

❑ Problemas sencillos

A menudo, un componente abierto o cortocircuitado produce tensiones únicas. Por ejemplo, la única manera de obtener 10 V en la base del transistor

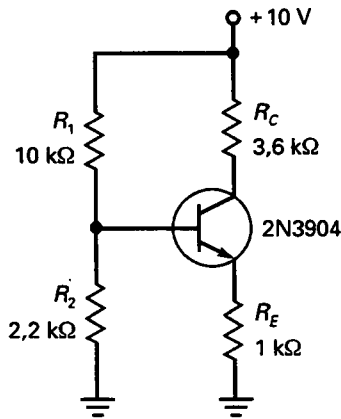


Figura 8-15. Detección de averías.

de la Figura 8-15 es con R_1 cortocircuitada. La mayoría de las entradas de la Tabla 8-1 producen un único conjunto de tensiones, con lo que podemos identificarlo sin desmontar el circuito para hacer más pruebas.

❑ Problemas ambiguos

Dos problemas de la Tabla 8-1 no producen tensiones únicas: R_{1O} y R_{2S} . Ambos tienen tensiones de 0, 0 y 10 V. Con problemas ambiguos como éste, el detector de averías desconectará uno de los componentes sospechosos y empleará un polímetro para probarlo. Por ejemplo, podríamos desconectar R_1 y medir su resistencia con un polímetro. Si está abierto, habremos encontrado el problema. Si está bien, entonces R_2 estará cortocircuitada.

❑ Carga del voltímetro

Siempre que use un voltímetro, estará conectando una nueva resistencia al circuito. Esta resistencia robará corriente del circuito. Si el circuito tiene una resistencia grande, la tensión medida puede ser menor de la correcta.

Por ejemplo, supongamos la resistencia de emisor abierta en la Figura 8-15. La tensión en la base es 1,8 V. Ya que no puede haber corriente de emisor con la resistencia de emisor abierta, la tensión antes de medir debería ser de 1,8 V.

Cuando medimos V_E con un voltímetro de 10 MΩ, estaremos conectando una resistencia de 10 MΩ entre el emisor y tierra. Esto permite la circulación de una pequeña corriente de emisor, lo que provoca una tensión a través del diodo emisor. Por esto, $V_E = 1,37$ V en vez de 1,8 V para R_{EO} en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1. Problemas y síntomas

Problema	V_B	V_E	V_C	Comentario
Ninguno	1,79	1,12	6	Sin problemas
R_{1S}	10	9,17	9,2	Transistor saturado
R_{1O}	0	0	10	Transistor cortado
R_{2S}	0	0	10	Transistor cortado
R_{2O}	3,38	2,68	2,73	Se simplifica a una polarización con realimentación de emisor
R_{ES}	0,71	0	0,06	Transistor saturado
R_{EO}	1,8	1,37	10	Un voltímetro de 10 MΩ reduce V_E
R_{CS}	1,79	1,12	10	Resistencia de colector cortocircuitada
R_{CO}	1,07	0,4	0,43	Corriente de base grande
CES	2,06	2,06	2,06	Todos los terminales del transistor cortocircuitados
CEO	1,8	0	10	Todos los terminales del transistor abiertos
No V_{CC}	0	0	0	Comprobar fuente de alimentación y fusibles

8-7. TRANSISTORES PNP

En la Figura 8-16 se muestra la estructura de un transistor *pn*p y su símbolo eléctrico. Como las zonas dopadas son de tipo opuesto, es necesario invertir la forma de considerar su funcionamiento. Específicamente, tal cambio quiere decir que los huecos son los portadores mayoritarios en el emisor en vez de serlo los electrones libres.

❑ Ideas básicas

De manera breve, la explicación de lo que sucede a nivel atómico es la siguiente: el emisor inyecta huecos en la base, la mayor parte de los cuales fluyen hacia el colector. Por esta razón, la corriente de colector es casi igual a la corriente de emisor.

En la Figura 8-17 se ven las tres corrientes del transistor indicadas según el flujo convencional. Las flechas continuas representan la corriente convencional y las discontinuas el flujo de electrones.

❑ Fuente de alimentación negativa

En la Figura 8-18a se observa una polarización a través de un divisor de tensión con un transistor *pn*p y una fuente de tensión negativa de -10 V . El 2N3906 es el complementario del 2N3904, lo que supone que sus características tienen los mismos valores absolutos que los del 2N3904, pero las polaridades de todas las corrientes y todas las tensiones están invertidas. Al comparar este circuito *pn*p con el circuito *npn* de la Figura 8-15, las únicas diferencias que se observan son las tensiones de alimentación y los transistores.

Siempre que tengamos un circuito con transistores *npn*, podremos obtener el mismo circuito con una fuente de alimentación negativa y transistores *pn*p.

❑ Fuente de alimentación positiva

Las fuentes de alimentación positivas son mucho más comunes que las fuentes de alimentación negativas. Por ello, a menudo se ven transistores *pn*p dibujados como se muestra en la Figura 8-18b. Así es como se comporta el circuito: la tensión a través de R_2 es aplicada al diodo emisor en serie con la resistencia de emisor. Esto produce la corriente de emisor. La corriente de colector circula a través de RC, produciendo la tensión de colector a tierra. Para detección de averías, podemos calcular V_C , V_B y V_E como sigue:

1. Obtener la tensión en R_2 .
2. Restar $0,7\text{ V}$ para obtener la tensión a través de la resistencia de emisor.
3. Hallar la corriente de emisor.
4. Calcular la tensión de colector a tierra.
5. Calcular la tensión de base a tierra.
6. Calcular la tensión de emisor a tierra.

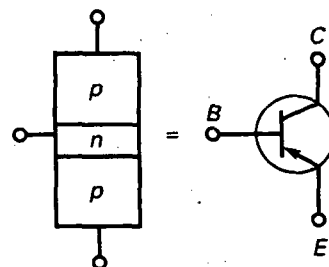


Figura 8-16. Transistor *pn*p.

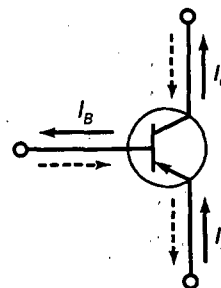


Figura 8-17. Corrientes *pn*p.

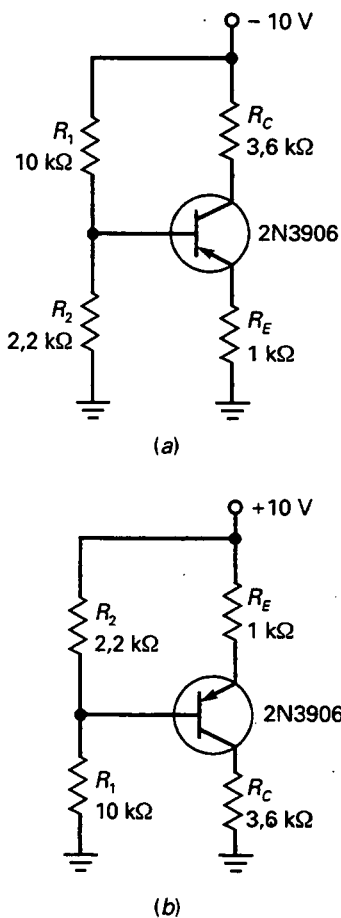


Figura 8-18. Circuito *pn*p. a) Alimentación negativa; b) alimentación positiva.

EJEMPLO 8-6

Calcular las tres tensiones del transistor *pn*p para el circuito de la Figura 8-18b.

SOLUCIÓN

Comencemos con la tensión a través de R_2 . Podemos calcular esta tensión usando la ecuación del divisor de tensión:

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{EE}$$

Alternativamente, podemos calcular la tensión de otra manera: obtener la corriente a través del divisor de tensión y multiplicarla por R_2 . El resultado sería el siguiente:

$$I = \frac{10 \text{ V}}{12,2 \text{ k}\Omega} = 0,82 \text{ mA}$$

$$V_2 = (0,82 \text{ mA})(2,2 \text{ k}\Omega) = 1,8 \text{ V}$$

Después, restando 0,7 V a esta tensión conseguiremos la tensión a través de la resistencia de emisor:

$$V_E = 1,8 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 1,1 \text{ V}$$

Entonces, calculamos la corriente de emisor:

$$I_E = \frac{1,1 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,1 \text{ mA}$$

Cuando la corriente de colector circula a través de la resistencia de colector, produce una tensión a tierra de

$$V_C = (1,1 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 3,96 \text{ V}$$

La tensión de base a tierra es:

$$V_B = 10 \text{ V} - 1,8 \text{ V} = 8,2 \text{ V}$$

La tensión entre emisor y tierra es:

$$V_E = 10 \text{ V} - 1,1 \text{ V} = 8,9 \text{ V}$$

RESUMEN

Sección 8-1. Polarización por divisor de tensión

El circuito más famoso basado en el prototipo de polarización de emisor es el llamado polarización por divisor de tensión. Se le reconoce por el divisor de tensión del circuito de base.

Sección 8-2. Análisis del circuito de polarización por divisor de tensión

La idea fundamental es que la corriente de base ha de ser mucho menor que la corriente del divisor de tensión. Cuando esta condición se satisface, el divisor de tensión hace que la tensión de base sea casi constante e igual a la tensión sin carga obtenida del divisor de tensión. Esto da lugar a un punto Q fijo en todas las condiciones de funcionamiento.

Sección 8-3. Recta de carga y punto Q para el circuito de polarización por divisor de tensión

La recta de carga se traza pasando por dos puntos de saturación y de corte. El punto Q se localiza sobre la recta de carga y su ubicación exacta está determinada por la polarización. Las grandes variaciones de la ganancia de corriente tienen un efecto casi nulo sobre el punto Q , ya que este tipo de polarización establece un valor constante para la corriente de emisor.

Sección 8-4. Polarización de emisor con dos fuentes

En este diseño se utilizan dos fuentes de alimentación, una positiva y otra negativa. Con ello se pretende establecer un valor constante para la corriente de emisor. Este circuito es una variación del prototipo de polarización de emisor estudiado antes.

Sección 8-5. Otros tipos de polarización

En esta sección se introdujo la realimentación negativa, un fenómeno que se da cuando un aumento en una variable de salida produce una disminución en una variable de entrada. Se trata de una brillante idea que condujo finalmente a la polarización por divisor de tensión. Los otros tipos de polarización no pueden emplear la suficiente realimentación negativa, por lo que no alcanzan el nivel de funcionamiento de la polarización por divisor de tensión.

Sección 8.6. Detección de averías

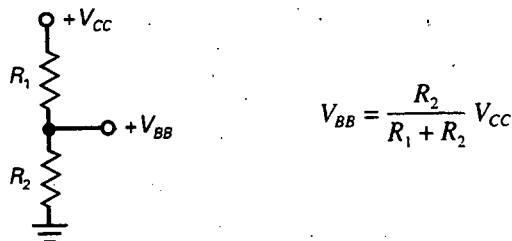
La detección de averías es un arte y, por ello, no puede reducirse a un conjunto de reglas. La mejor forma de aprender a localizar averías es tratando de encontrarlas.

Sección 8-7. Transistores *pnp*

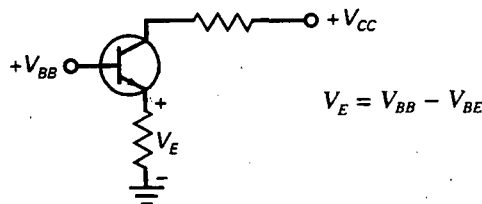
Estos dispositivos *pnp* tienen todas las corrientes y todas las tensiones invertidas con respecto a sus equivalentes *npn*. Pueden trabajar con fuentes negativas de alimentación, aunque comúnmente lo hacen con fuentes positivas de alimentación con el colector conectado a través una resistencia a masa.

ECUACIONES DE POLARIZACIÓN POR DIVISOR DE TENSION

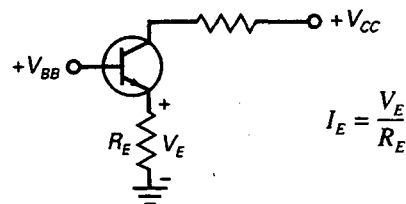
(8-1) Tensión de base:



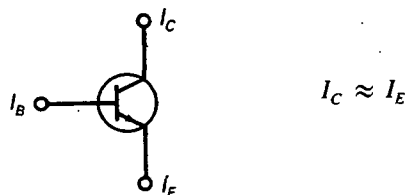
(8-2) Tensión de emisor:



(8-3) Corriente de emisor:

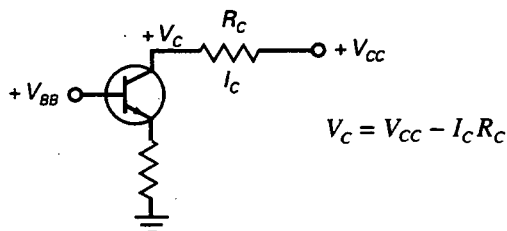


(8-4) Corriente de colector:

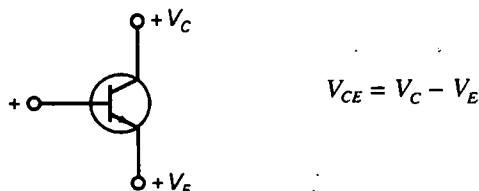


296 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

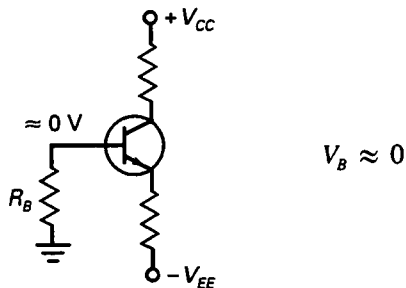
(8-5) Tensión de colector:



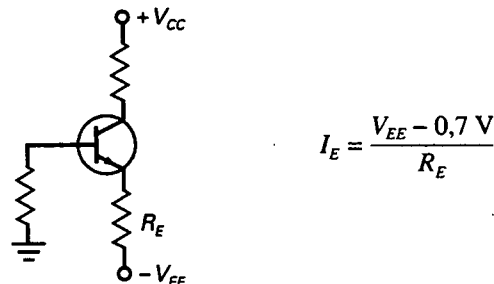
(8-6) Tensión emisor-colector:

**ECUACIONES DE POLARIZACIÓN DE EMISOR CON DOS FUENTES DE ALIMENTACIÓN**

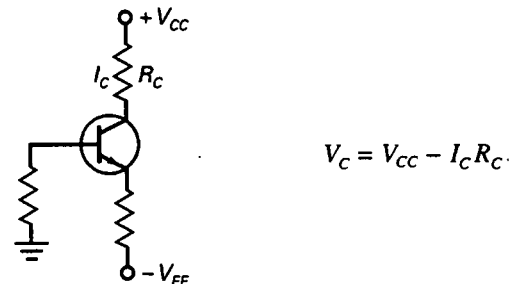
(8-13) Tensión de base:



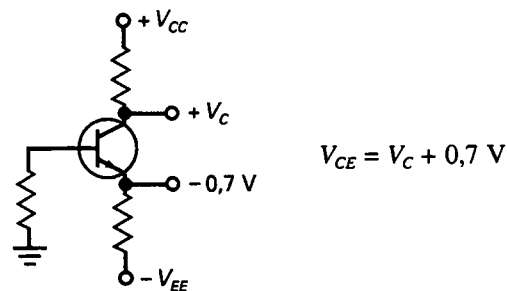
(8-14) Corriente de emisor:



(8-15) Tensión de colector:



(8-16) Tensión emisor-colector:

**EJERCICIOS PARA EL ALUMNO****CUESTIONES**

- En la polarización de emisor, la tensión en la resistencia de emisor es la misma que la tensión entre el emisor y
 - La base
 - El colector
 - El emisor
 - Masa
- En la polarización de emisor, la tensión en el emisor es 0,7 V menor que
 - La tensión de base
 - La tensión de emisor
 - La tensión de colector
 - La tensión de masa
- En la polarización por divisor de tensión, la tensión de base es
 - Menor que la tensión de la fuente de polarización base
 - Igual a la tensión de la fuente de polarización de base
 - Mayor que la tensión de la fuente de polarización de base
 - Mayor que la tensión de la fuente de polarización de colector
- El circuito de polarización por divisor de tensión se distingue por su
 - Tensión de colector inestable

- b) Corriente de emisor variable
 - c) Gran corriente de base
 - d) Punto Q estable
5. En el circuito de polarización por divisor de tensión, un aumento en la resistencia de emisor hará que
- a) Disminuya la tensión de emisor
 - b) Disminuya la tensión de colector
 - c) Aumente la tensión de emisor
 - d) Disminuya la corriente de emisor
6. El circuito de PDT tiene un punto Q estable similar al de la polarización
- a) De base
 - b) De emisor
 - c) Con realimentación de colector
 - d) Con realimentación de emisor
7. El circuito de PDT requiere
- a) Sólo tres resistencias
 - b) Sólo una fuente
 - c) Resistencias de precisión
 - d) Más resistencias para trabajar mejor
8. El circuito de PDT funciona normalmente en la zona
- a) Activa
 - b) De corte
 - c) De saturación
 - d) De ruptura
9. La tensión de colector en un circuito PDT es insensible a los cambios en
- a) La tensión de la fuente
 - b) La resistencia de emisor
 - c) La ganancia de corriente
 - d) La resistencia de colector
10. Si en un circuito de PDT la resistencia de emisor aumenta, la tensión de colector
- a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) Se duplica
11. La polarización de base está asociada con
- a) Los amplificadores
 - b) Los circuitos digitales
 - c) Un punto Q estable
 - d) Una corriente de emisor constante
12. Si la resistencia de emisor se duplica en un circuito de PDT, entonces la corriente de colector
- a) Se duplica
 - b) Se reduce a la mitad
 - c) No cambia
 - d) Aumenta
13. Si la resistencia de colector aumenta en un circuito de PDT, la tensión de colector
- a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) Se duplica

POLARIZACIÓN DE LOS TRANSISTORES 297

14. El punto Q en un circuito de PDT es
- a) Muy sensible a los cambios en la ganancia de corriente
 - b) Algo sensible a los cambios o la ganancia de corriente
 - c) Casi totalmente insensible a los cambios en la ganancia de corriente
 - d) Afectado notablemente por los cambios de la temperatura
15. En la polarización de emisor con dos fuentes (PEDF), la tensión de base
- a) Es de 0,7 V
 - b) Es muy grande
 - c) Vale casi 0 V
 - d) Es de 1,3 V
16. Si la resistencia de emisor se duplica en la PEDF, entonces la corriente de colector
- a) Disminuye a la mitad
 - b) No cambia
 - c) Se duplica
 - d) Aumenta
17. Si una gota de soldadura pone en cortocircuito la resistencia de colector de la PEDF, entonces la tensión de colector
- a) Se hace cero
 - b) Es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector
 - c) No cambia
 - d) Se duplica
18. Si la resistencia de emisor aumenta en la PEDF, la tensión de colector
- a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) Es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector
19. Si la resistencia de emisor se pone en circuito abierto en la PEDF, entonces la tensión de colector
- a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta ligeramente
 - d) Es igual a la tensión de la fuente de polarización de colector
20. En la PEDF, la corriente de base debe ser muy
- a) Pequeña
 - b) Grande
 - c) Inestable
 - d) Estable
21. En la PEDF, el punto Q no depende de
- a) La resistencia de emisor
 - b) La resistencia de colector
 - c) La ganancia de corriente
 - d) La tensión de emisor
22. Los portadores mayoritarios en el emisor de un transistor *pnp* son
- a) Los huecos
 - b) Los electrones libres
 - c) Los átomos trivalentes
 - d) Los átomos pentavalentes

298 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

23. La ganancia de corriente en un transistor *pn*p es
- Negativa respecto a la ganancia de corriente *n*p*n*
 - La corriente de colector dividida entre la corriente de emisor
 - Casi cero
 - La relación entre la corriente de colector y la corriente de base
24. ¿Cuál es la corriente mayor en un transistor *pn*p?
- La corriente de base
 - La corriente de emisor
 - La corriente de colector
 - Ninguna de éstas
25. Las corrientes en un transistor *pn*p son
- Por lo general menores que las corrientes *n*p*n*
 - Opuestas a las corrientes *n*p*n*
 - Normalmente mayores que las corrientes *n*p*n*
 - Negativas
26. En la polarización por divisor de tensión de un *pn*p se tienen que emplear
- Fuentes negativas de alimentación
 - Fuentes positivas de alimentación
 - Resistencias
 - Masas

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

- Dibujar un circuito de PDT. Después, comentar todos los pasos seguidos para el cálculo de la tensión colector-emisor. ¿Por qué este circuito tiene un punto *Q* muy estable?
- Dibujar un circuito de PEDF y comentar cómo funciona. ¿Qué pasa con la corriente de colector cuando cambiamos de transistor o varía la temperatura?
- Describe otros tipos de polarización. ¿Qué puede decir acerca del punto *Q*?
- ¿Cuáles son los dos tipos de polarización con realimentación y por qué fueron desarrollados?
- ¿Cuál es la polarización básica usada en circuitos simples de transistores bipolares?
- ¿Podrían los transistores ser usados como circuitos de conmutación polarizándolos en la región activa? Si no es así, ¿qué dos puntos asociados con la línea de carga son importantes en los circuitos conmutados?
- En un circuito PDT, la corriente de base no es pequeña comparada con la que atraviesa el divisor de tensión. ¿Cuál es el problema de este circuito?
- ¿Cuál es la configuración de polarización de transistor más comúnmente usada?

- Dibujar un circuito PDT usando un transistor *n*p*n*. Señalar las direcciones de la corriente en el divisor, la base, emisor y colector.
- ¿Qué está mal en el circuito PDT en el que R_1 y R_2 son 100 veces mayores que R_E ?

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 8-1. Análisis del circuito de PDT

- 8-1. ¿Cuál es la tensión de emisor de la Figura 8-19?
¿Y la tensión de colector?

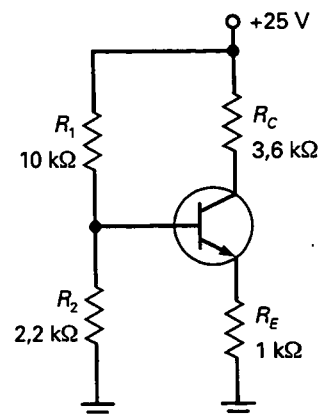


Figura 8-19

- 8-2. ¿Cuál es la tensión de emisor de la Figura 8-20?
¿Y la tensión de colector?

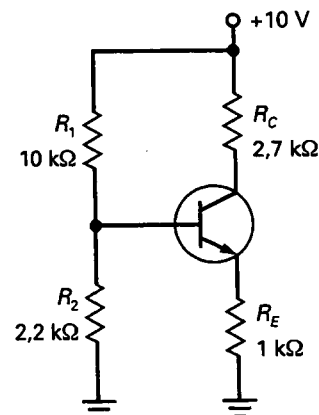


Figura 8-20

- 8-3. ¿Cuál es la tensión de emisor de la Figura 8-21?
¿Y la tensión de colector?

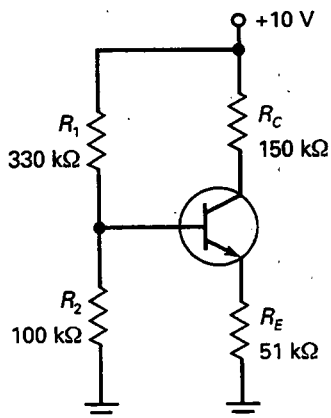


Figura 8-21

- 8-4. ¿Cuál es la tensión de emisor de la Figura 8-22? ¿Y la tensión de colector?

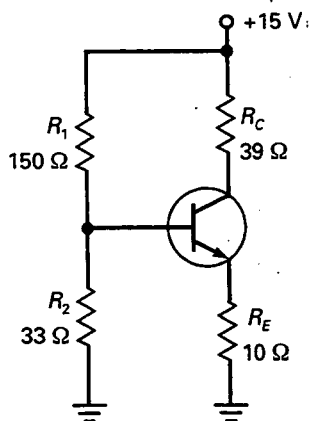


Figura 8-22

- 8-5. Todas las resistencias de la Figura 8-21 tienen una tolerancia de ± 5 por 100. ¿Cuál es el mínimo valor posible para la tensión de colector? ¿Y el valor máximo posible?
- 8-6. La fuente de alimentación de la Figura 8-22 tiene una tolerancia de ± 10 por 100. ¿Cuál es el mínimo valor posible para la tensión de colector? ¿Y el valor máximo posible?

Sección 8-3. Recta de carga y punto Q para el circuito PDT

- 8-7. ¿Cuál es el punto Q para el circuito de la Figura 8-19?
- 8-8. ¿Cuál es el punto Q para el circuito de la Figura 8-20?
- 8-9. ¿Cuál es el punto Q para el circuito de la Figura 8-21?

POLARIZACIÓN DE LOS TRANSISTORES 299

- 8-10. ¿Cuál es el punto Q para el circuito de la Figura 8-22?
- 8-11. Todas las resistencias de la Figura 8-21 tienen una tolerancia de ± 5 por 100. ¿Cuál es el valor mínimo para la corriente de colector? ¿Y el valor máximo?
- 8-12. La fuente de alimentación de la Figura 8-22 tiene una tolerancia posible de ± 10 por 100. ¿Cuál es el mínimo valor posible de la corriente de colector? ¿Y el valor máximo?

Sección 8-4. Polarización de emisor con dos fuentes

- 8-13. ¿Cuál es el valor de la corriente de emisor en la Figura 8-23? ¿Cuál es el valor de la tensión de colector?
- 8-14. Si todas las resistencias de la Figura 8-23 se duplican, ¿qué valor tiene la corriente de emisor? ¿Y la tensión de colector?
- 8-15. Todas las resistencias de la Figura 8-23 tienen una tolerancia de ± 5 por 100. ¿Cuál es el mínimo valor posible para la tensión de colector? ¿Y el valor máximo?

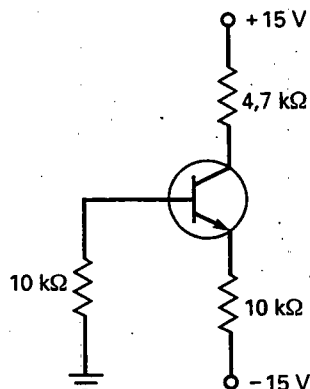


Figura 8-23

Sección 8-5. Otros tipos de polarización

- 8-16. La tensión de colector, ¿aumenta, disminuye o se mantiene constante en el circuito de la Figura 8-22 cuando se registran cambios pequeños en cada una de las magnitudes siguientes?
- R_1 aumenta
 - R_2 disminuye
 - R_E aumenta
 - R_C disminuye
 - V_{CC} aumenta
 - β_{dc} disminuye
- 8-17. La tensión de colector, ¿aumenta, disminuye o se mantiene constante en el circuito de la Figura 8-23?

300 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

ra 8-24 cuando se registran pequeños aumentos en las magnitudes siguientes?

- | | |
|----------|-----------------|
| a) R_1 | d) R_C |
| b) R_2 | e) V_{CC} |
| c) R_E | f) β_{dc} |

Sección 8-6. Detección de averías

- 8-18. ¿Cuál es el valor aproximado de la tensión de colector en la Figura 8-22 para cada uno de los fallos siguientes?
- R_1 en circuito abierto
 - R_2 en circuito abierto
 - R_E en circuito abierto
 - R_C en circuito abierto
 - Colector-emisor en circuito abierto
- 8-19. ¿Cuál es el valor aproximado de la tensión de colector en el circuito de la Figura 8-24 para cada uno de los fallos siguientes?
- R_1 en circuito abierto
 - R_2 en circuito abierto
 - R_E en circuito abierto
 - R_C en circuito abierto
 - Colector-emisor en circuito abierto

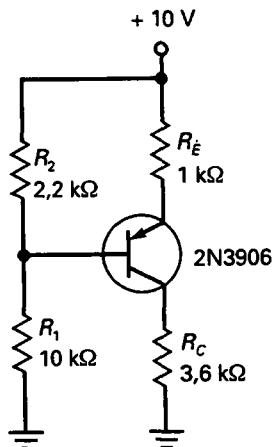


Figura 8-24

Sección 8-7. Transistores pnp

- 8-20. ¿Qué valor tiene la tensión de colector en la Figura 8-24?
- 8-21. ¿Qué valor tiene la tensión colector-emisor en la Figura 8-24?
- 8-22. ¿Qué valor tiene la corriente de saturación de colector en el circuito de la Figura 8-24? ¿Y la tensión de corte colector-emisor?
- 8-23. ¿Cuánto vale la tensión de emisor en el circuito de la Figura 8-25? ¿Cuánto vale la tensión de colector?

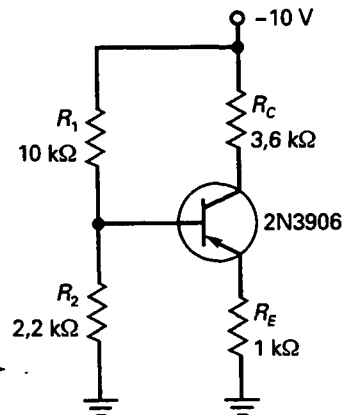


Figura 8-25

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 8-24. Alguien construyó el circuito de la Figura 8-22, pero cambió el divisor de tensión como sigue: $R_1 = 150 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$. Quien lo hizo no se explica por qué la tensión de base es apenas de 0,77 V, en vez de ser de 2,7 V (la salida ideal del divisor de tensión). ¿Puede el lector explicar qué es lo que sucede?
- 8-25. Alguien construye el circuito de la Figura 8-22 empleando un 2N3904. ¿Qué opina el lector sobre ello?
- 8-26. Un estudiante desea medir la tensión colector-emisor en el circuito de la Figura 8-22, así que conecta un voltímetro entre el colector y el emisor. ¿Qué lectura obtiene?
- 8-27. Suponga que en el circuito de la Figura 8-22 se le da la libertad de cambiar cualquiera de los componentes del circuito. Para ese caso, enumere todas las formas posibles de destruir el transistor.
- 8-28. La fuente de alimentación en la Figura 8-22 debe suministrar corriente al circuito. Enumere todos los métodos que podría emplear para determinar dicha corriente.
- 8-29. Calcule la tensión de colector para cada uno de los transistores de la Figura 8-26. (Sugerencia: Los condensadores son circuitos abiertos respecto de la corriente continua.)
- 8-30. En el circuito de la Figura 8-27a se emplean diodos de silicio. ¿Cuánto vale la corriente de emisor? ¿Y la de colector?
- 8-31. ¿Qué valor tiene la tensión de salida en el circuito de la Figura 8-27b?
- 8-32. ¿Cuál es el valor de la corriente que circula por el LED de la Figura 8-28a?

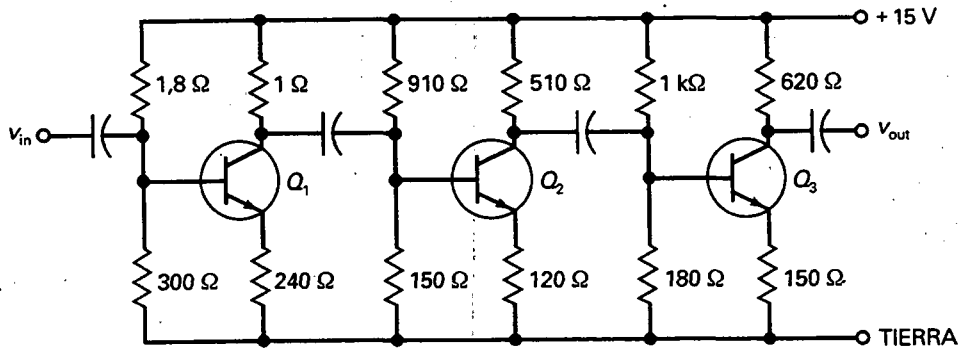


Figura 8-26

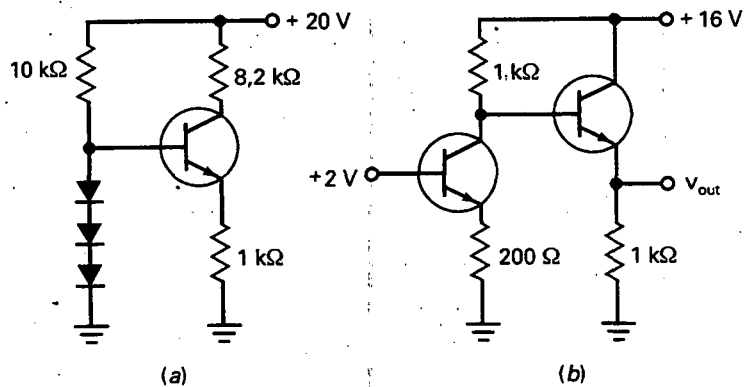


Figura 8-27

8-33. ¿Cuál es el valor de la corriente que circula por el LED de la Figura 8-28b?

8-34. Se desea que el divisor de tensión de la Figura 8-21 sea constante. Haga los cambios necesarios en R_1 y R_2 sin cambiar el punto Q .

PROBLEMAS DE DETECCIÓN DE AVERÍAS

Emplee la Figura 8-29 para los problemas siguientes.

- 8-35. Diga cuál es el fallo 1.
- 8-36. Diga cuál es el fallo 2.
- 8-37. Localice los fallos 3 y 4.
- 8-38. Localice los fallos 5 y 6.
- 8-39. Detecte los fallos 7 y 8.
- 8-40. Detecte los fallos 9 y 10.
- 8-41. Localice los fallos 11 y 12.

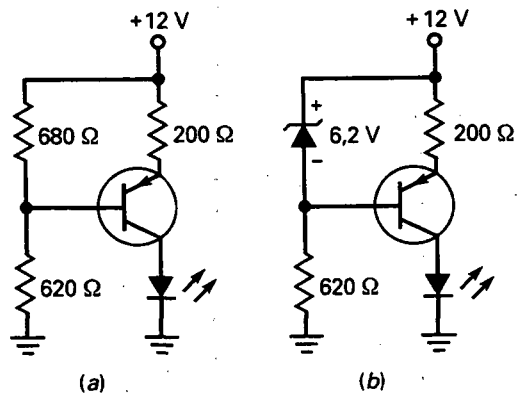
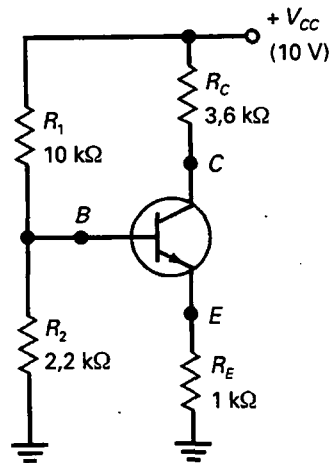


Figura 8-28

302 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA



	1	2	3	4	5	6	7
A	10	1,1	2,7	1,1	0	0,7	0
B	0	1,8	∞	2,1	OK	10	1,83
C	0,5	0	1,13	7	3,4	1,13	OK
D	9,3	OK	1,8	1,1	10	10	1,1
E	0	2,1	8	4	0,4	OK	3
F	1,83	10	9,4	0	10	6	2,1
G	2,1	2,8	0,4	2,9	1,5	0,1	0

MEDIDAS

OK	T1	T2	T3	T4	T5	T6
$V_B: B2$	$V_B: D5$	$V_B: A6$	$V_B: D3$	$V_B: E2$	$V_B: F4$	$V_B: C5$
$V_E: D7$	$V_E: D1$	$V_E: C2$	$V_E: D7$	$V_E: F7$	$V_E: A5$	$V_E: A3$
$V_C: F6$	$V_C: F3$	$V_C: G6$	$V_C: A1$	$V_C: B4$	$V_C: B6$	$V_C: G2$
$R_2: D2$	$R_2: E6$	$R_2: D2$	$R_2: B5$	$R_2: C7$	$R_2: D2$	$R_2: B3$

T7	T8	T9	T10	T11	T12
$V_B: F1$	$V_B: B1$	$V_B: D4$	$V_B: A2$	$V_B: A5$	$V_B: F1$
$V_E: C6$	$V_E: C2$	$V_E: E5$	$V_E: E5$	$V_E: F4$	$V_E: C2$
$V_C: B6$	$V_C: D5$	$V_C: C1$	$V_C: D5$	$V_C: C2$	$V_C: D6$
$R_2: E6$	$R_2: A5$	$R_2: D2$	$R_2: D2$	$R_2: D2$	$R_2: B5$

Figura 8-29

Modelos equivalentes para señal

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Dibujar un transistor amplificador y explicar cómo funciona.
- Explicar el funcionamiento de los condensadores de acoplo y desacoplo.
- Dar ejemplos de cortocircuitos y masas para señal.
- Utilizar el teorema de superposición para dibujar los circuitos equivalentes para continua y para señal.
- Definir el funcionamiento para pequeña señal y decir por qué es conveniente.
- Dibujar un amplificador que usa polarización por divisor de tensión (PDT). Dibujar su circuito equivalente para señal.

VOCABULARIO

- | | | |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|
| • amplificador con dos fuentes de polarización de emisor | • amplificador en emisor común (EC) | • distorsión |
| • amplificador con polarización de base | • amplificador para pequeña señal | • ganancia de corriente continua |
| • amplificador con polarización por divisor de tensión | • circuito equivalente para continua | • ganancia de corriente para señal |
| • amplificador en base común (BC) | • circuito equivalente para señal | • modelo π |
| • amplificador en colector común (CC) | • condensador de desacoplo | • modelo de Ebers-Moll |
| | • condensador de acoplo | • modelo T |
| | | • resistencia de emisor para señal |
| | | • teorema de superposición |

Cuando un transistor se ha polarizado con el punto Q cerca del punto medio de la recta de carga, se puede aplicar a la base una pequeña señal alterna, lo que produce una señal alterna en el colector. Dicha señal en el colector se parece a la original, pero es mucho mayor; es decir, la tensión de la señal de colector es una versión amplificada de la tensión de la señal de la base.

La invención de los dispositivos amplificadores, primero las lámparas o tubos de vacío y más tarde los transistores, fue crucial para la evolución de la electrónica. Sin la amplificación no existirían la radio, la televisión o las computadoras.

9-1. LOS TRES TIPOS DE FÓRMULAS

En esta sección explicaremos el amplificador con polarización de base. Aunque un amplificador con polarización de base no es útil para producción en serie, tiene valor didáctico porque las ideas básicas se pueden aplicar para construir amplificadores más complicados.

□ Condensador de acoplo

La Figura 9-1a muestra una fuente de tensión alterna conectada a un condensador y a una resistencia. Como la impedancia del condensador es inversamente proporcional a la frecuencia, el condensador bloquea la tensión continua y transmite la tensión alterna. Cuando la frecuencia es suficientemente alta, la reactancia capacitiva es mucho menor que la resistencia. En este caso, casi toda la tensión alterna de la fuente aparece en la resistencia. Cuando se usa de esta forma, el condensador se denomina *condensador de acoplo* porque acopla la señal alterna a la resistencia. Los condensadores de acoplo son importantes porque nos permiten acoplar una señal alterna a un amplificador sin distorsionar su punto Q .

Para que un condensador de acoplo funcione apropiadamente, su reactancia debe ser mucho menor que la resistencia a la frecuencia más baja de la señal de la fuente alterna. Por ejemplo, si la frecuencia de la fuente alterna varía de 20 Hz a 20 kHz, el peor caso ocurre a 20 Hz. Un diseñador de circuitos seleccionará un condensador cuya reactancia a 20 Hz sea mucho menor que la resistencia.

¿Cuánto es mucho menor? Como definición:

$$\text{Buen acoplamiento: } X_C < 0,1 R \quad (9-1)$$

Es decir, la reactancia debería ser al menos diez veces menor que la resistencia para la frecuencia más baja de funcionamiento. Cuando se satisface la regla 10:1, la Figura 9-1a se puede reemplazar por el circuito equivalente de la Figura 9-1b. ¿Por qué? La magnitud de la impedancia en la Figura 9-1a viene dada por:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Cuando se sustituye el peor caso en esta fórmula obtenemos:

$$Z = \sqrt{R^2 + (0,1 R)^2} = \sqrt{R^2 + 0,01 R^2} = \sqrt{1,01 R^2} = 1,005 R$$

Como la impedancia está dentro de un rango de 5 por 1.000 sobre R a la frecuencia más baja, la corriente en la Figura 9-1a es sólo 5 por 1.000 menor que la corriente en la Figura 9-1b.

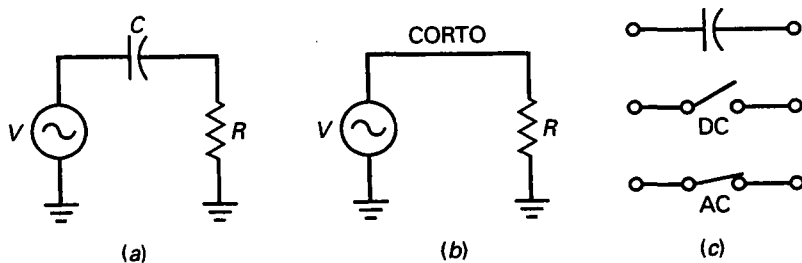


Figura 9-1. a) Condensador de acoplo; b) en el condensador es un cortocircuito para señal; c) circuito abierto para continua y cortocircuito para señal.

Como cualquier circuito bien diseñado satisface la regla 10:1, podemos aproximar todos los condensadores de acoplo como un cortocircuito para señal alterna (Fig. 9-1b).

Un comentario final acerca de los condensadores de acoplo: como la tensión continua tiene una frecuencia de cero, la reactancia de un condensador de acoplo es infinita a frecuencia cero. Por tanto, emplearemos estas dos aproximaciones para un condensador:

1. Para el análisis en continua, el condensador está abierto.
2. Para el análisis de alterna o señal, el condensador está en cortocircuito.

La Figura 9-1c resume estas dos importantes ideas. A menos que se indique lo contrario, todos los circuitos que analicemos desde ahora satisfacen la regla 10:1, de modo que podemos imaginar un condensador de acoplo como se muestra en la Figura 9-1c.

□ Circuito de continua

La Figura 9-2a muestra un circuito con polarización de base. La tensión continua de la base es 0,7 V. Como 30 V es mucho mayor que 0,7 V, la corriente de base es aproximadamente 30 V dividida por 1 M Ω , o:

$$I_B = 30 \mu\text{A}$$

Con una ganancia de corriente de 100, la corriente de colector es:

$$I_C = 3 \text{ mA}$$

y la tensión de colector:

$$V_C = 30 \text{ V} - (3 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega) = 15 \text{ V}$$

Así que el punto Q está localizado en 3 mA y 15 V.

□ Circuito amplificador

La Figura 9-2b muestra cómo añadir componentes para construir un amplificador. Primero, se usa un condensador de acoplo entre la fuente de señal y la base. Como el condensador de acoplo está abierto para corriente continua, la misma corriente de base continua existe con o sin el condensador y la fuente de señal. Similarmente, se usa un condensador de acoplo entre el colector y la resistencia de carga de 100 k Ω . Como este condensador está abierto para corriente continua, la tensión continua de colector es la misma, con o sin el condensador y la resistencia de carga. La idea clave es que los condensadores de acoplo protegen la fuente de señal y la resistencia de carga de cambios en el punto Q.

En la Figura 9-2b, la tensión de la fuente de señal es 100 μV . Como el condensador de acoplo es un cortocircuito para señal, toda la tensión de la fuente de señal aparece entre la base y la masa. Esta tensión de señal produ-

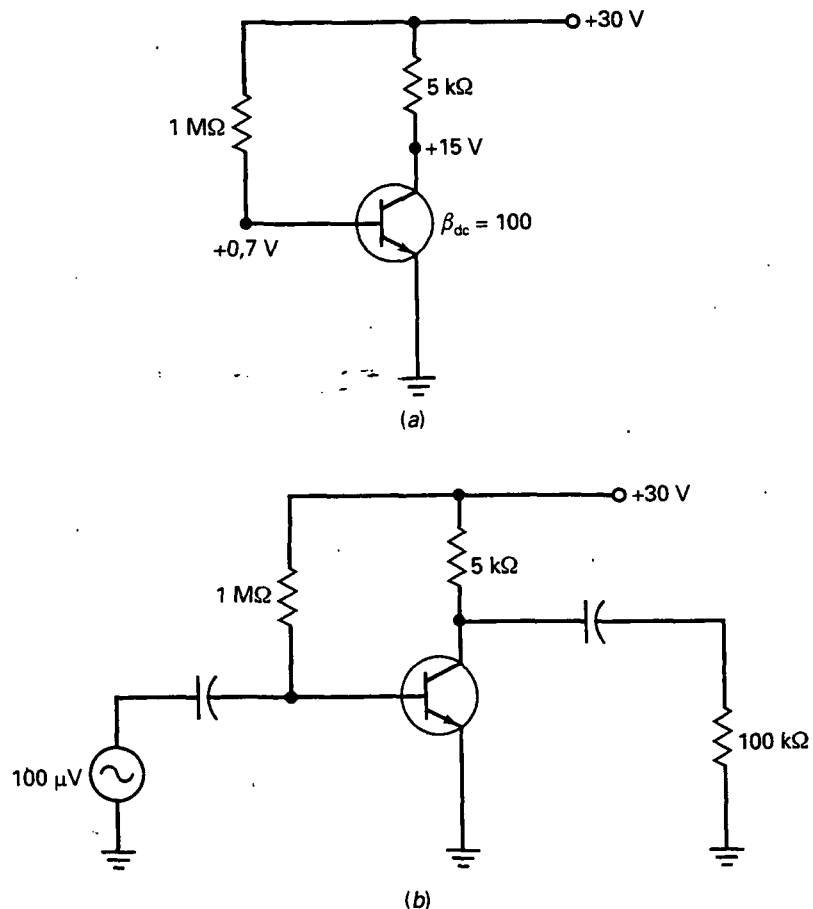


Figura 9-2. a) Polarización de base; b) amplificador con polarización de base.

ce una corriente de señal en la base que se añade a la corriente de base continua existente; esto es, la corriente total en la base tendrá una componente de continua y una componente de señal.

La Figura 9-3a ilustra la idea. Se superpone una componente de señal a la componente continua. En la mitad positiva del ciclo, la corriente de señal en la base se añade a los 30 μA de la corriente de base continua, y en la mitad negativa del ciclo se resta de ella.

La corriente de señal en la base produce una variación amplificada en la corriente de colector a causa de la ganancia de corriente. En la Figura 9-3b la corriente de colector tiene una componente continua de 3 mA. Superpuesta a ésta tenemos la corriente de señal en el colector. Como esta corriente de colector amplificada circula a través de la resistencia de colector, produce una tensión que varía a través de la resistencia de colector. Cuando esta tensión se resta de la tensión de la fuente, obtenemos la tensión de colector que se muestra en la Figura 9-3c.

De nuevo, una componente de señal se superpone a una componente continua. La tensión de colector oscila sinusoidalmente por encima y por

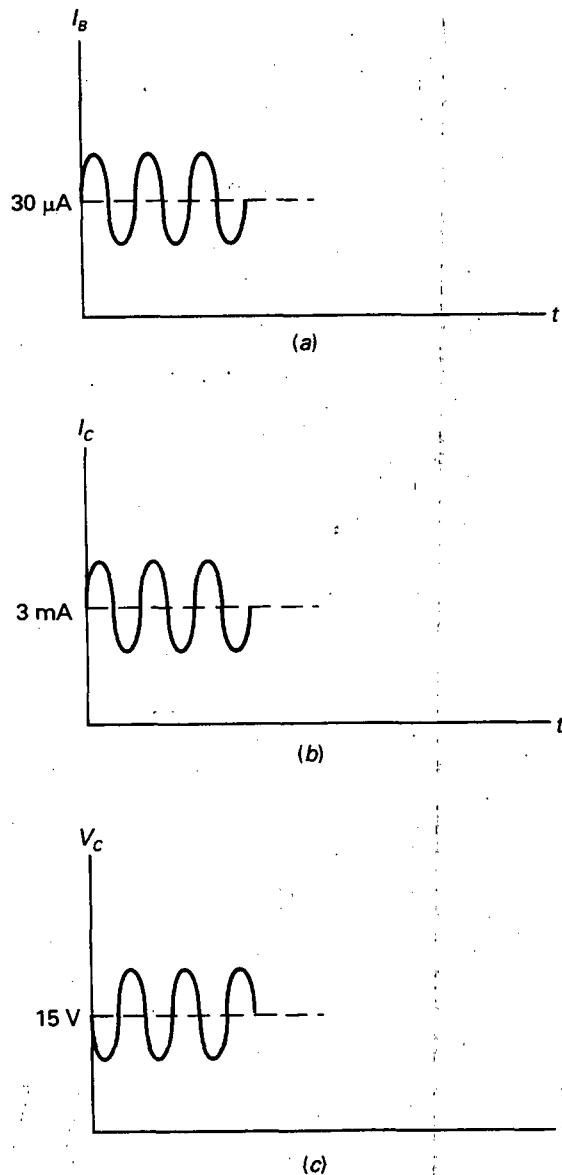


Figura 9-3. Componentes de continua y de alterna. a) Corriente de base; b) corriente de colector; c) tensión de colector.

debajo del nivel de continua de + 15 V. También, la tensión de colector para señal está invertida, 180° desfasada con la tensión de entrada. ¿Por qué? En la mitad positiva del ciclo de la corriente de señal en la base, la corriente de colector se incrementa, produciendo más tensión a través de la resistencia de colector. Esto significa que hay menos tensión entre colector y masa. Similarmen-te, en la mitad negativa del ciclo, la corriente de colector decrece. Como hay menos tensión a través de la resistencia de colector, la tensión de colector se incrementa.

□ Formas de onda

La Figura 9-4 muestra las formas de onda para un amplificador con polarización de base. La tensión de la fuente de señal es una tensión sinusoidal pequeña. Ésta se acopla a la base, donde se superpone a la componente de continua de +0,7 V. La variación en la tensión de la base produce variaciones sinusoidales en la corriente de base, corriente de colector y tensión de colector. La tensión de colector total es una onda sinusoidal invertida superpuesta a la tensión de colector de continua de +15 V.

Fíjese en la acción del condensador de acoplo de salida. Como es un circuito abierto para la corriente continua, bloquea la componente de continua de la tensión de colector. Al ser un cortocircuito para la corriente alterna, acopla la tensión alterna de colector a la resistencia de carga. Por este motivo, la tensión de la carga es una señal puramente alterna con un valor medio de cero.

□ Ganancia de tensión

La ganancia de tensión de un amplificador se define como la tensión alterna de salida dividida por la tensión alterna de entrada. Como definición:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (9-2)$$

Por ejemplo, si medimos una tensión alterna en la carga de 50 mV con una tensión alterna de entrada de 100 μ V, la ganancia de tensión es:

$$A = \frac{50 \text{ mV}}{100 \mu\text{V}} = 500$$

Esto significa que la tensión alterna de salida es 500 veces mayor que la tensión alterna de entrada.

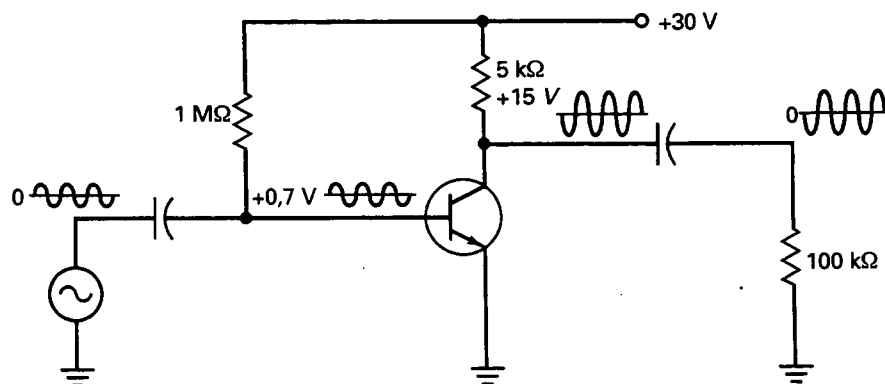


Figura 9-4. Amplificador con polarización de base y formas de onda.

□ Cálculo de la tensión de salida

Podemos multiplicar ambos lados de la Ecuación (9-2) por v_{in} para obtener esta derivación:

$$v_{out} = A v_{in} \quad (9-3)$$

Esto es útil cuando se quiere calcular el valor que v_{out} , dados los valores de A y v_{in} .

Por ejemplo, el símbolo triangular mostrado en la Figura 9-5a se usa para indicar un amplificador en cualquier diseño. Como tenemos una tensión de entrada de 2 mV y una ganancia de tensión de 200, podemos calcular la tensión de salida como:

$$v_{out} = (200)(2 \text{ mV}) = 400 \text{ mV}$$

□ Cálculo de la tensión de entrada

Podemos dividir a ambos lados de la Ecuación (9-3) por A para obtener esta derivación:

$$v_{in} = \frac{v_{out}}{A} \quad (9-4)$$

lo que es útil cuando se quiere calcular el valor de v_{in} , dados los valores v_{out} y A . Por ejemplo, la tensión de salida es 2,5 V en la Figura 9-5b. Con una ganancia de tensión de 350, la tensión de entrada es:

$$v_{in} = \frac{2,5 \text{ V}}{350} = 7,14 \text{ mV}$$

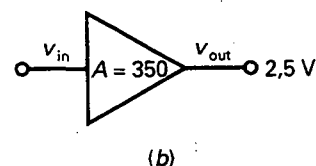
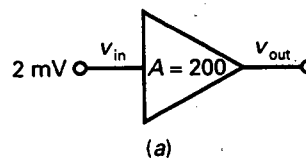


Figura 9-5. a) Cálculo de la tensión de salida; b) cálculo de la tensión de entrada.

9-2. AMPLIFICADOR CON POLARIZACIÓN DE EMISOR

El amplificador con polarización de base tiene un punto Q inestable. Por esta razón, no se usa mucho como amplificador. En lugar de él, se prefiere un amplificador con polarización de emisor (tanto PDT como PEDF) con su punto Q estable.

□ Condensador de desacoplo

Un condensador de desacoplo es similar a un condensador de acoplo porque aparece abierto con corrientes continuas y en corto con corrientes alternas. Pero no se usa para acoplar una señal entre dos puntos. En lugar de eso se usa para crear una masa de alterna o masa para señal.

La Figura 9-6a muestra una fuente de tensión alterna conectada a una resistencia y un condensador. Cuando la frecuencia es suficientemente alta, la reactancia capacitiva es mucho menor que la resistencia. En este caso, casi toda la tensión de la fuente de señal aparece a través de la resistencia. Dicho de otra forma, el punto E está efectivamente en corto con la masa.

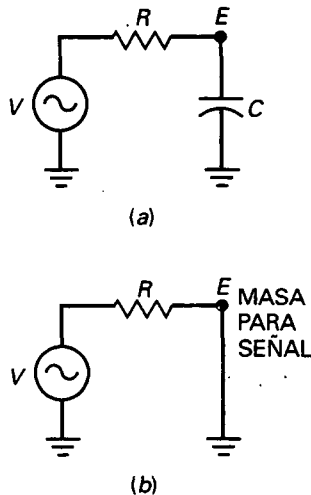


Figura 9-6. a) Condensador de desacoplo; b) el punto E es una masa para señal.

Cuando se usa de esta forma, el condensador se denomina *condensador de desacoplo* porque corta el punto E con la masa. Un condensador de desacoplo es importante porque nos permite crear una masa para señal en un amplificador sin distorsionar su punto Q.

Para que un condensador de desacoplo funcione correctamente, su reactancia debe ser mucho menor que la resistencia a la frecuencia más baja de la fuente de señal. La definición para un buen desacoplo es idéntica a la que se dio para un buen acoplo:

$$\text{Buen desacoplo: } X_C < 0,1 R \quad (9-5)$$

Cuando se satisface esta regla, la Figura 9-6a se puede reemplazar por el circuito equivalente de la Figura 9-6b.

□ Amplificador PDT

La Figura 9-7 muestra un *amplificador con polarización por divisor de tensión* (PDT). Para calcular las tensiones y corrientes continuas se abren mentalmente todos los condensadores. Después, el circuito del transistor se simplifica al circuito PDT analizado en el Capítulo 8. Los valores de continua para este circuito son:

$$\begin{aligned} V_B &= 1,8 \text{ V} \\ V_E &= 1,1 \text{ V} \\ V_C &= 6,04 \text{ V} \\ I_C &= 1,1 \text{ mA} \end{aligned}$$

Como antes, usamos un condensador de acoplo entre la fuente y la base, y otro condensador de acoplo entre colector y la resistencia de carga. También necesitamos usar un condensador de desacoplo entre el emisor y masa. Sin este condensador, la corriente alterna de la base podría ser mucho más pequeña; pero con el condensador de desacoplo obtendremos una ganancia de tensión mucho mayor. Los detalles matemáticos de esto se argumentarán en el siguiente capítulo.

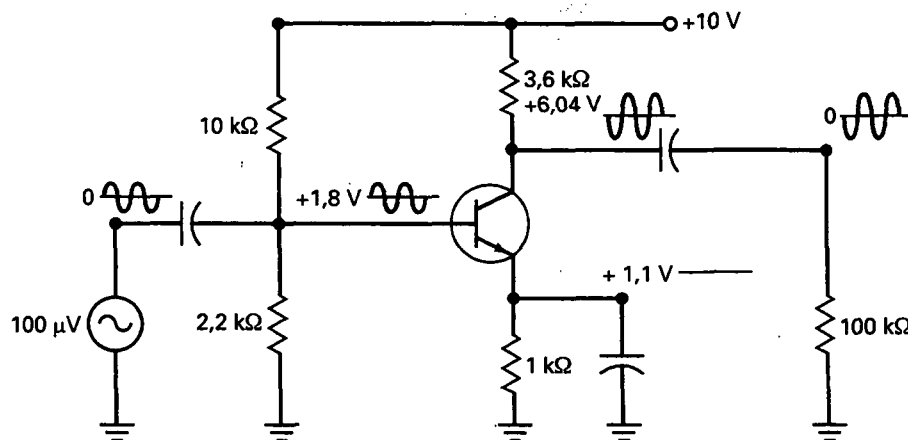


Figura 9-7. Amplificador PDT y formas de onda.

En la Figura 9-7, la tensión de la fuente de señal es $100 \mu\text{V}$. Esta tensión se acopla a la base. A causa del condensador de desacoplo, toda esta tensión alterna aparece en el diodo base-emisor. La corriente alterna de la base produce entonces una tensión alterna de colector amplificada, como se describió previamente.

□ Formas de onda en el PDT

Fíjese en las formas de onda de la tensión de la Figura 9-7. La tensión de la fuente de señal es una tensión sinusoidal pequeña con un valor medio de cero. La tensión de la base es una tensión alterna superpuesta a una tensión continua de $+1,8 \text{ V}$. La tensión de colector es la tensión alterna amplificada e invertida superpuesta a la tensión continua de colector de $+6,04 \text{ V}$. La tensión en la carga es la misma que la tensión de colector, excepto que tiene un valor medio de cero.

Fíjese también en la tensión en el emisor. Es una tensión continua pura de $+1,1 \text{ V}$. No hay tensión alterna en el emisor porque el emisor es una masa para señal, resultado directo del empleo de un condensador de desacoplo. Es importante recordarlo porque es útil para detectar averías. Si el condensador de desacoplo estuviera abierto, podría aparecer una tensión alterna entre el emisor y masa. Este síntoma apuntaría inmediatamente al condensador de desacoplo abierto como única avería.

□ Circuitos discretos contra integrados

El amplificador PDT de la Figura 9-7 es la forma estándar de construir un amplificador a transistores discreto. *Discreto* significa que todos los componentes, como resistencias, condensadores y transistores se insertan y conectan individualmente para obtener el circuito final. Un *circuito discreto* se diferencia de un *circuito integrado (IC)* en que todos los componentes se crean y conectan simultáneamente en un *chip*, un pedazo de material semiconductor. En capítulos posteriores se explicará *el amplificador operacional*, un amplificador en circuito integrado que produce ganancias de tensión mayores que 100.000.

□ Circuito PEDF

La Figura 9-8 muestra un amplificador con polarización de emisor con dos fuentes (PEDF). Analizamos la parte continua del circuito en el Capítulo 8 y calculamos estas tensiones de funcionamiento:

$$\begin{aligned} V_B &\approx 0 \text{ V} \\ V_E &= -0,7 \text{ V} \\ V_C &= 5,32 \text{ V} \\ I_C &= 1,3 \text{ mA} \end{aligned}$$

La Figura 9-8 muestra dos condensadores de acoplo y un condensador de desacoplo en el emisor. El funcionamiento del circuito para señal es similar al de un amplificador PDT. Se acopla una señal a la base. La señal es

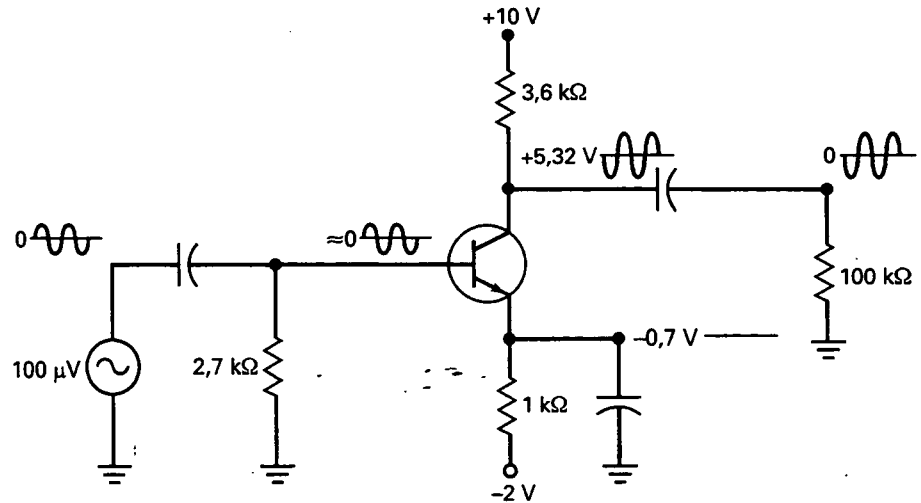


Figura 9-8. Amplificador PEDF y formas de onda.

amplificada para obtener la tensión de colector. La señal amplificada se acopla después a la carga.

Fíjese en las formas de onda. La tensión de la fuente alterna es una tensión sinusoidal pequeña. La tensión de la base es una pequeña componente alterna montada sobre una componente de continua de aproximadamente 0 V. La tensión total de colector es una onda sinusoidal invertida montada sobre una tensión de continua de colector de +5,32 V. La tensión en la carga es la misma señal amplificada sin componente continua.

Fíjese de nuevo en la tensión de continua pura en el emisor, resultado directo de usar el condensador de desacoplo. Si el condensador de desacoplo estuviera abierto aparecería una tensión alterna en el emisor. Esto reduciría enormemente la ganancia de tensión. Por tanto, si se detectan averías en un amplificador con condensadores de desacoplo, recuerde que todas las masas de señal deben tener tensión alterna cero.

9-3. FUNCIONAMIENTO PARA PEQUEÑA SEÑAL

La Figura 9-9 muestra la curva de la corriente en función de la tensión para el diodo base-emisor. Cuando se acopla una tensión alterna a la base de un transistor aparece una tensión alterna a través del diodo base-emisor. Esto produce la variación sinusoidal en V_{BE} que se muestra en la Figura 9-9.

□ El punto instantáneo de trabajo

Cuando la tensión aumenta hasta su valor de pico positivo, el punto instantáneo de trabajo se mueve desde Q hacia el punto superior mostrado en la Figura 9-9. Por otra parte, cuando la onda sinusoidal alcanza su valor de pico negativo, el punto instantáneo de trabajo se mueve desde Q hacia el punto inferior.

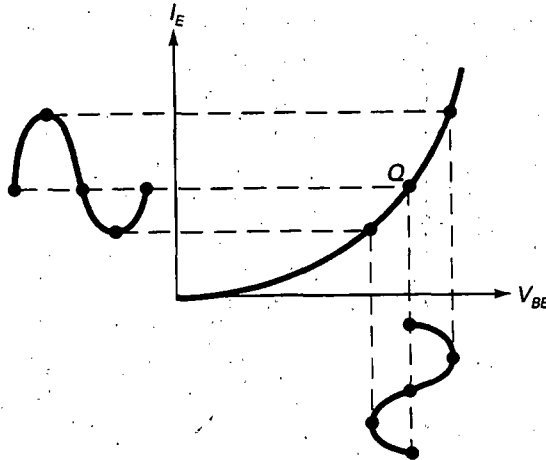


Figura 9-9. Distorsión cuando la señal es demasiado grande.

La tensión total base-emisor en la Figura 9-9 es una tensión de señal alterna centrada en una tensión continua. La amplitud de la señal alterna determina cuánto se aleja el punto instantáneo del punto Q . Grandes amplitudes de señal producirán grandes variaciones, mientras que amplitudes pequeñas producirán sólo variaciones pequeñas.

□ Distorsión

La señal aplicada a la base produce una corriente en el emisor, como se aprecia en la Figura 9-9. Esta corriente alterna de emisor tiene la misma frecuencia que la tensión alterna de base. Por ejemplo, si el generador que excita a la base tiene una frecuencia de 1 kHz, la corriente alterna de emisor tendrá una frecuencia de 1 kHz. Además, la corriente de emisor tiene más o menos la misma forma que la tensión alterna de la base. Si la tensión de base es sinusoidal, entonces la corriente de emisor será aproximadamente sinusoidal.

La razón por la cual la corriente de emisor no es una réplica perfecta de la tensión de base es la curvatura de la gráfica. Como ésta es una curva cóncava, el semiciclo positivo de la corriente de emisor se alarga, mientras que el semiciclo negativo se comprime. A este efecto se le da el nombre de *distorsión*. No es deseable en los amplificadores de alta fidelidad, pues modifica el sonido de la voz y de la música.

□ Cómo reducir la distorsión

Una forma de reducir la distorsión para el circuito de la Figura 9-9 consiste en mantener un valor pequeño de señal en la base. Si se reduce el valor de pico de la tensión en la base, se reduce el desplazamiento del punto instantáneo de trabajo. Cuanto menor sea esta excursión o fluctuación, menor pare-

ce la curvatura de la gráfica. Si la señal es lo suficientemente pequeña, la curva parece una línea recta.

¿Por qué es esto importante? Porque para una señal pequeña no hay distorsión. En este caso, los cambios en la corriente de emisor son directamente proporcionales a los cambios en la tensión de base, ya que la curva es casi lineal. En otras palabras, si la señal de base es una onda sinusoidal suficientemente pequeña, la corriente de emisor causada por ella también será una onda sinusoidal pequeña y apenas se verá distorsionada.

□ La regla del 10 por 100

La corriente total de emisor mostrada en la Figura 9-9 consiste en una componente continua y una componente alterna, que se puede escribir como

$$I_E = I_{EQ} + i_e$$

donde

I_E = la corriente total de emisor

I_{EQ} = la corriente continua de emisor

i_e = la corriente alterna de emisor

Para minimizar la distorsión, el valor pico a pico de i_e debe ser pequeño comparado con I_{EQ} . Nuestra definición de funcionamiento con pequeña señal es:

$$\text{Pequeña señal: } i_{e(pp)} < 0,1 I_{EQ} \quad (9-6)$$

Esto significa que la señal alterna es pequeña cuando la corriente alterna pico a pico de emisor es menor que el 10 por 100 de la corriente de emisor. Por ejemplo, si la corriente continua de emisor es 10 mA, como se muestra en la Figura 9-10, la corriente pico a pico de emisor debería ser menor que 1 mA para tener funcionamiento con pequeña señal.

De ahora en adelante, a aquellos amplificadores que satisfagan la regla del 10 por 100 los llamaremos *amplificadores para pequeña señal*. Este tipo de amplificador se utiliza en las primeras etapas de los receptores de radio y

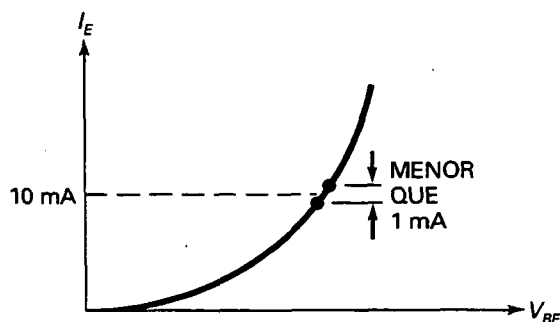


Figura 9-10. Definición de funcionamiento para pequeña señal.

de televisión. La razón es que la señal que viene de la antena es una señal muy débil. Al acoplarse a un transistor amplificador una señal débil producirá variaciones muy pequeñas en la corriente de emisor, mucho menores que las requeridas por la regla del 10 por 100.

9-4. GANANCIA PARA SEÑAL

En todas las formulaciones planteadas hasta este momento, la ganancia de corriente ha sido la ganancia de corriente en continua. Ésta se definió como:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \quad (9-7)$$

Las corrientes en esta fórmula son las corrientes en el punto Q de la Figura 9-11. A causa de la curvatura de la gráfica de I_C en función de I_B , la ganancia de corriente continua depende de la localización del punto Q .

□ Definición

La ganancia de corriente para señal es diferente. Se define como:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (9-8)$$

Es decir, la ganancia de corriente para señal es igual a la corriente alterna de colector dividida por la corriente alterna de base. En la Figura 9-11, la

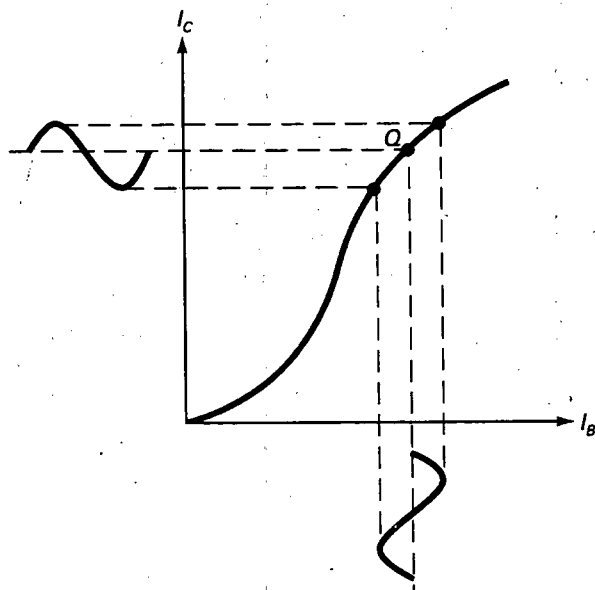


Figura 9-11. La ganancia de corriente para señal es igual al cociente de cambios.

señal alterna usa sólo una pequeña parte de la curva a ambos lados del punto Q . A causa de esto, el valor de la ganancia de corriente para señal es diferente del valor de la ganancia de corriente continua, que usa casi toda la curva.

Gráficamente, β es igual a la pendiente de la curva en el punto Q en la Figura 9-11. Si polarizásemos el transistor a un punto Q diferente, la pendiente de la curva podría cambiar, lo que significa que β podría cambiar; es decir, el valor de β depende de la cantidad de corriente de colector.

En las hojas de características, β_{dc} aparece como h_{FE} y β aparece como h_{fe} . Fíjese en que los subíndices en mayúsculas se usan para corrientes continuas y los subíndices en minúsculas para corrientes alternas. Las dos ganancias de corriente tienen valores comparables, no se diferencian en una gran cantidad. Por esta razón, si se tiene el valor de una, se puede usar el mismo valor para la otra en análisis preliminares.

□ Notación

Para mantener los valores de continua distintos de los de alterna, es una práctica estándar usar letras mayúsculas y subíndices para valores de continua. Por ejemplo, hemos estado usando:

I_E , I_C e I_B para las corrientes continuas;
 V_E , V_C y V_B para las tensiones continuas;
 V_{BE} , V_{CE} y V_{CB} para las tensiones continuas entre terminales.

Para los valores de alterna, usaremos letras minúsculas y subíndices como sigue:

i_e , i_c e i_b para las corrientes alternas;
 v_e , v_c y v_b para las tensiones alternas;
 v_{be} , v_{ce} y v_{cb} para las tensiones alternas entre terminales.

También se debe mencionar el uso de R mayúscula para resistencias en continua y r minúscula para resistencias para señal. La siguiente sección trata sobre resistencias para señal.

9-5. RESISTENCIA PARA SEÑAL DEL DIODO EMISOR

La Figura 9-12 muestra una curva de la corriente en función de la tensión para el diodo de emisor. Cuando hay una pequeña tensión de alterna entre los extremos del diodo emisor, se produce la corriente alterna de emisor que se muestra. La amplitud de esta corriente alterna de emisor depende de la localización del punto Q . A causa de la curvatura se obtiene más corriente alterna de emisor pico a pico cuando el punto Q está más alto en la gráfica.

□ Definición

Como se comentó en la Sección 9-3, la corriente total de emisor tiene una componente continua y una componente alterna. Matemáticamente:

$$I_E = I_{EQ} + i_e$$

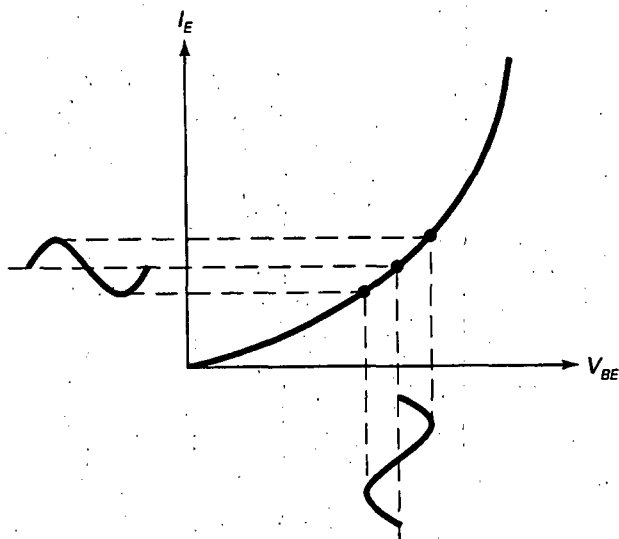


Figura 9-12. Resistencia para señal del diodo emisor.

donde I_{EQ} es la corriente continua de emisor e i_e es la corriente alterna de emisor.

De forma similar, la tensión total base-emisor de la Figura 9-12 tiene una componente continua y una componente alterna. Su ecuación se puede escribir como:

$$V_{BE} = V_{BEQ} + v_{be}$$

donde V_{BEQ} es la tensión continua base-emisor y v_{be} es la tensión alterna base-emisor.

En la Figura 9-12, la variación sinusoidal en V_{BE} produce una variación sinusoidal en I_E . El valor pico a pico de i_e depende de la localización del punto Q . A causa de la curvatura de la gráfica, una v_{be} fija produce más i_e a medida que el punto Q está polarizado en un punto más alto de la curva. Dicho de otro modo, la resistencia para señal del diodo emisor decrece cuando la corriente continua de emisor crece.

La resistencia para señal del diodo emisor se define como:

$$r'_e = \frac{v_{be}}{i_e} \quad (9-9)$$

Esto indica que la resistencia para señal del diodo emisor es igual a la tensión alterna base-emisor dividida por la corriente alterna de emisor. La prima (') en r'_e es una forma estándar de indicar que la resistencia está dentro del transistor.

Por ejemplo, la Figura 9-13 muestra una tensión alterna base-emisor de 5 mV pp. En el punto Q dado, esto indica una corriente alterna de emisor de 100 μ A pp. La resistencia para señal del diodo emisor es:

$$r'_e = \frac{5 \text{ mV}}{100 \text{ } \mu\text{A}} = 50 \text{ } \Omega$$

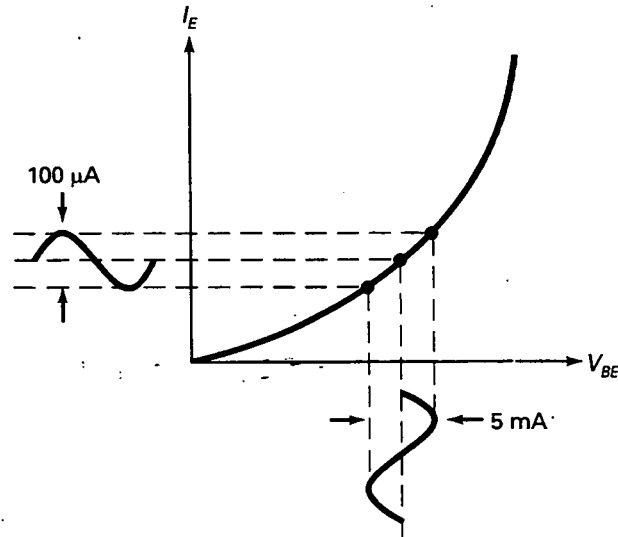


Figura 9-13. Cálculo de r'_e .

Como otro ejemplo, suponga que un punto Q más alto en la Figura 9-13 tiene $v_{be} = 5 \text{ mV}$ e $i_e = 200 \mu\text{A}$. Entonces la resistencia para señal decrece a:

$$r'_e = \frac{5 \text{ mV}}{200 \mu\text{A}} = 25 \Omega$$

La conclusión es la siguiente: la resistencia de emisor para señal siempre decrece cuando la corriente alterna de emisor crece, porque v_{be} es esencialmente un valor constante.

□ Fórmula para la resistencia de emisor para señal

Usando la física del estado sólido y algo de cálculo es posible derivar la siguiente fórmula importante para la resistencia de emisor para señal:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} \quad (9-10)$$

Esto indica que la resistencia para señal del diodo emisor es igual a 25 mV dividido por la corriente continua de emisor.

Esta fórmula es importante por su simplicidad y por el hecho de que se aplica a todos los tipos de transistores. Se usa mucho en la industria para calcular un valor preliminar para la resistencia para señal del diodo emisor. La derivación supone funcionamiento para pequeña señal, temperatura ambiente y una unión base-emisor rectangular y abrupta. Como los transistores comerciales tienen uniones graduales y no rectangulares, habrá algunas desviaciones de la Ecuación (9-10). En la práctica, casi todos los transisto-

res comerciales tienen una resistencia de emisor para señal entre $25 \text{ mV}/I_E$ y $50 \text{ mV}/I_E$.

La resistencia r_e' es importante porque determina la ganancia de tensión. Cuanto más pequeña es, mayor es la ganancia de tensión. En el Capítulo 10 se mostrará cómo emplear r_e' para calcular la ganancia de tensión de un transistor amplificador.

EJEMPLO 9-1

¿A qué es igual r_e' en el amplificador con polarización de base de la Figura 9-14a?

SOLUCIÓN

Primero, calculamos una corriente continua de emisor de aproximadamente 3 mA para este circuito. Con la Ecuación (9-10), la resistencia para señal del diodo emisor es:

$$r_e' = \frac{25 \text{ mV}}{3 \text{ mA}} = 8.33 \Omega$$

EJEMPLO 9-2

En la Figura 9-14b, ¿cuanto vale r_e' ?

SOLUCIÓN

En primer lugar, analizamos este amplificador PDT y calculamos una corriente continua de emisor de 1.1 mA . La resistencia para señal del diodo emisor es:

$$r_e' = \frac{25 \text{ mV}}{1.1 \text{ mA}} = 22.7 \Omega$$

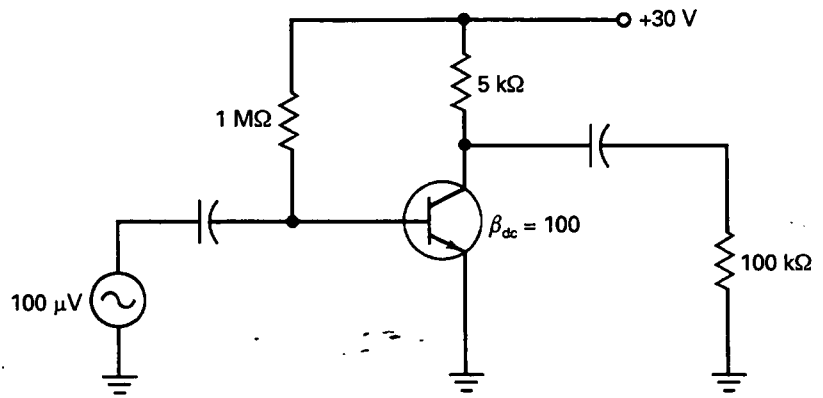
EJEMPLO 9-3

¿Cuál es la resistencia para señal del diodo emisor para el amplificador con polarización de emisor con dos fuentes de la Figura 9-14c?

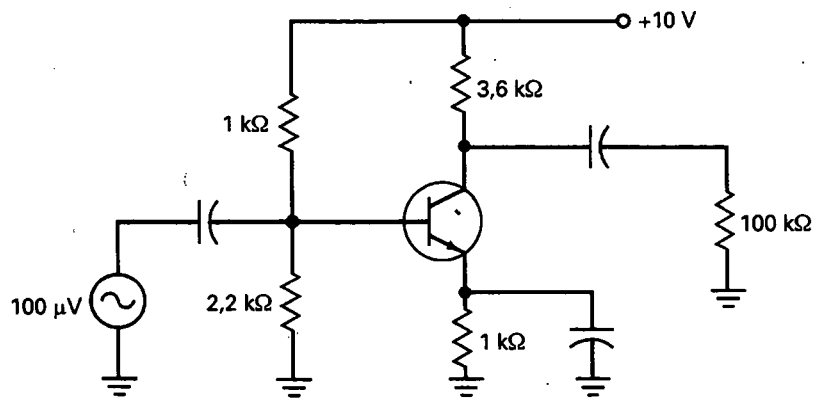
SOLUCIÓN

De los cálculos anteriores, tenemos una corriente continua de emisor de 1.3 mA . Ahora, podemos calcular la resistencia para señal del diodo emisor:

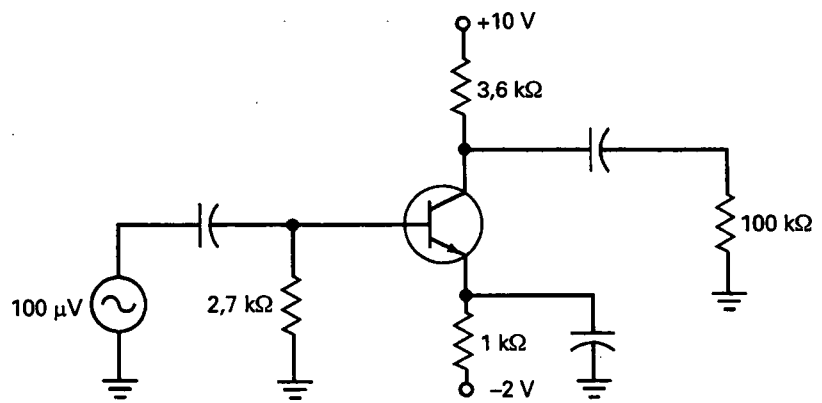
$$r_e' = \frac{25 \text{ mV}}{1.3 \text{ mA}} = 19.2 \Omega$$



(a)



(b)



(c)

Figura 9-14. a) Amplificador con polarización de base; b) amplificador PDT; c) amplificador PEDF.

9-6. DOS MODELOS DE TRANSISTOR

Para analizar el funcionamiento para señal de un transistor amplificador necesitamos un circuito equivalente para un transistor. Dicho de otro modo, necesitamos un modelo que simule cómo se comporta cuando se introduce una señal alterna.

□ El modelo T

Uno de los primeros modelos para señal fue el modelo de Ebers-Moll, que se muestra en la Figura 9-15. Por lo que concierne a pequeña señal, el diodo emisor de un transistor actúa como una resistencia en alterna r'_e y el diodo colector como una fuente de corriente i_c . Como el modelo de Ebers-Moll parece una T acostada, el circuito equivalente también se denomina *modelo T*.

Cuando se analiza un transistor amplificador se puede reemplazar cada transistor por un modelo T. Después, se puede calcular el valor de r'_e y otros valores para señal, como la ganancia de tensión. Los detalles se expondrán en el siguiente capítulo.

□ El modelo π

Cuando una señal alterna de entrada excita un transistor amplificador aparece una tensión alterna base-emisor v_{be} en el diodo emisor, como se muestra en la Figura 9-16a. Esto produce una corriente alterna de base i_b . La fuente de tensión alterna tiene que suministrar esta corriente alterna de base para que el transistor amplificador funcione correctamente. Dicho de otro modo, la fuente de tensión alterna está cargada por la impedancia de entrada de la base.

La Figura 9-16b ilustra la idea. Mirando hacia la base del transistor, la fuente de tensión alterna ve una impedancia de entrada $z_{in(base)}$. A frecuencias bajas, esta impedancia es puramente resistiva y definida como:

$$z_{in(base)} = \frac{v_{be}}{i_b} \quad (9-11)$$

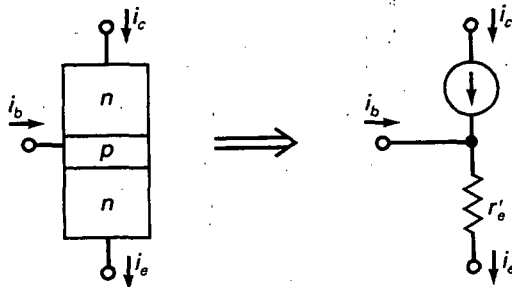
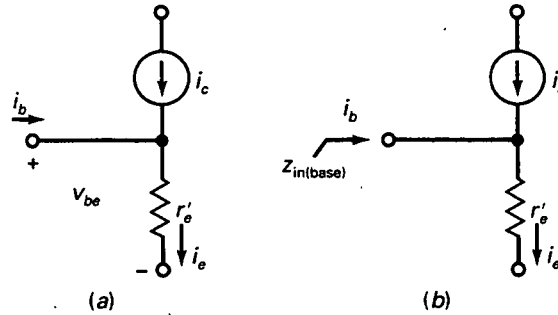


Figura 9-15. Modelo T de un transistor.

Figura 9-16. Definición de la impedancia de entrada de la base.



Aplicando la ley de Ohm al diodo emisor de la Figura 9-16a, podemos escribir:

$$v_{be} = i_e r'_e$$

Sustituyendo esta ecuación en la anterior se obtiene:

$$Z_{in(base)} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{i_e r'_e}{i_b}$$

Como $i_e \approx i_c$, la ecuación anterior se simplifica a:

$$Z_{in(base)} = \beta r'_e \quad (9-12)$$

Esta ecuación nos indica que la impedancia de entrada de la base es igual a la ganancia de corriente alterna multiplicada por la resistencia para señal del diodo emisor.

La Figura 9-17a muestra el modelo π de un transistor y constituye una representación visual de la Ecuación (9-12). El modelo π es más fácil de usar que el modelo T (Fig. 9-17b) porque la impedancia de entrada no es obvia cuando se mira el modelo T. Por otro lado, el modelo π muestra claramente que una impedancia de entrada de $\beta r'_e$ cargará la fuente de tensión que excita la base.

Como los modelos π y T son circuitos equivalentes de alterna para un transistor, podemos usar cualquiera de los dos cuando analizamos un amplificador. La mayoría de las veces usaremos el modelo π . Con algunos circuitos como los amplificadores diferenciales del Capítulo 17, el modelo T ofrece una mejor interpretación del funcionamiento del circuito. Ambos modelos son muy utilizados en la industria.

9-7. CÓMO ANALIZAR UN AMPLIFICADOR

El análisis de un amplificador es complejo porque ambas fuentes de continua y de señal están en el mismo circuito. Para analizar amplificadores, podemos calcular primero el efecto de las fuentes de continua y después el efecto de las fuentes de señal.

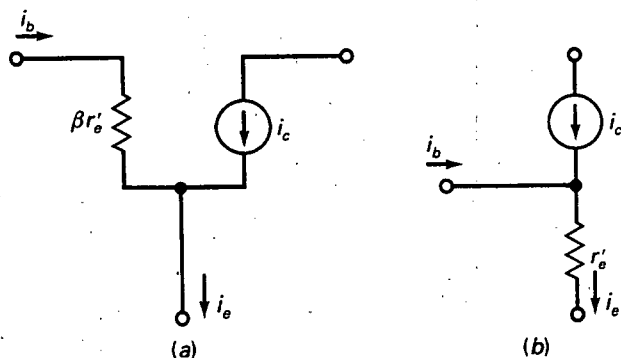


Figura 9-17. Modelo π de un transistor.

□ El circuito equivalente para continua

La forma más simple de analizar un amplificador es dividir el análisis en dos partes: un análisis en continua y un análisis en alterna. En el análisis en continua podemos calcular las tensiones y corrientes continuas, para lo cual abrimos mentalmente todos los condensadores. El circuito que queda es el *circuito equivalente para continua*.

Con el circuito equivalente para continua podemos calcular las corrientes y tensiones del transistor que se necesitan. Si se están detectando averías es adecuado aproximar respuestas. La corriente más importante en el análisis en continua es la corriente continua de emisor. Ésta es necesaria para calcular r'_e en el análisis para señal.

□ Efecto en alterna de una fuente de tensión continua

En la Figura 9-18a se muestra un circuito con fuentes de continua y de señal. ¿Cuál es la corriente alterna en un circuito como éste? Por lo que concierne a la corriente alterna, la fuente de tensión continua actúa como un cortocircuito en alterna, como se muestra en la Figura 9-18b. ¿Por qué? Porque una fuente de tensión continua tiene una tensión constante a través de ella. Por lo tanto, cualquier corriente alterna que fluye a través de ella no puede producir una tensión alterna en sus bornes. Si no puede existir tensión alterna, la fuente de tensión continua es equivalente a un cortocircuito en alterna.

Otra forma de entender la idea es recordar el teorema de superposición explicado en cursos básicos de electrónica. Para aplicar superposición a la Figura 9-18a podemos calcular el efecto de cada fuente actuando separadamente mientras las otras se reducen a cero. Reducir la fuente de tensión continua a cero equivale a cortocircuitarla. Por lo tanto, para calcular el efecto de la fuente de alterna en la Figura 9-18a ponemos en cortocircuito todas las fuentes de tensión continua.

A partir de ahora pondremos en corto las fuentes de tensión continua cuando analicemos el funcionamiento en alterna de un amplificador. Como se muestra en la Figura 9-18b, esto significa que cada una de las fuentes de tensión actúa como una masa para señal.

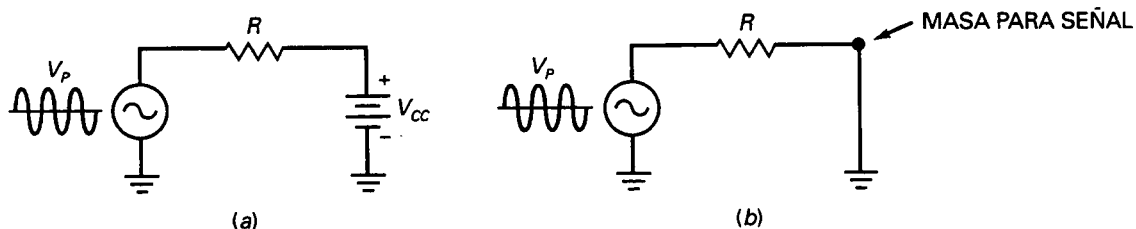


Figura 9-18. La fuente de tensión continua es un cortocircuito para señal.

□ Circuito equivalente para señal

Después de analizar el circuito equivalente en continua, el siguiente paso consiste en analizar el *circuito equivalente para señal*. Éste es el circuito que queda después de que se han cortocircuitado mentalmente todos los condensadores y todas las fuentes de tensión continua. El transistor se puede sustituir tanto con el modelo π como con el modelo T. En el siguiente capítulo expondremos los detalles matemáticos del análisis para señal. Para el resto de este capítulo nos centraremos en cómo obtener el circuito equivalente para señal para los tres amplificadores explicados hasta ahora: polarización de base, PDT y PEDF.

□ Amplificador con polarización de base

La Figura 9-19a es un amplificador con polarización de base. Después de abrir mentalmente todos los condensadores y analizar el circuito equivalente para continua, estamos listos para el análisis en alterna. Para obtener el circuito equivalente para señal cortocircuitamos todos los condensadores y fuentes de tensión alterna. Entonces, el punto etiquetado como $+V_{CC}$ es una masa para señal.

La Figura 9-19b muestra el circuito equivalente para señal. Como se puede observar, el transistor ha sido sustituido por su modelo π . En el circuito de base la tensión alterna de entrada aparece a través de R_b en paralelo con $\beta r'_e$. En el circuito de colector, la fuente de corriente bombea una corriente alterna i_c a través de R_C en paralelo con R_L .

□ Amplificador PDT

La Figura 9-20a es un amplificador PDT y la Figura 9-20b es su circuito equivalente para señal. Como se puede observar, todos los condensadores han sido cortocircuitados, la fuente de continua se ha convertido en una masa para señal y el transistor ha sido sustituido por su modelo π . En el circuito de base la tensión alterna de entrada aparece a través de R_1 en paralelo con R_2 en paralelo con $\beta r'_e$. En el circuito de colector, la fuente de corriente bombea una corriente alterna i_c a través de R_C en paralelo con R_L .

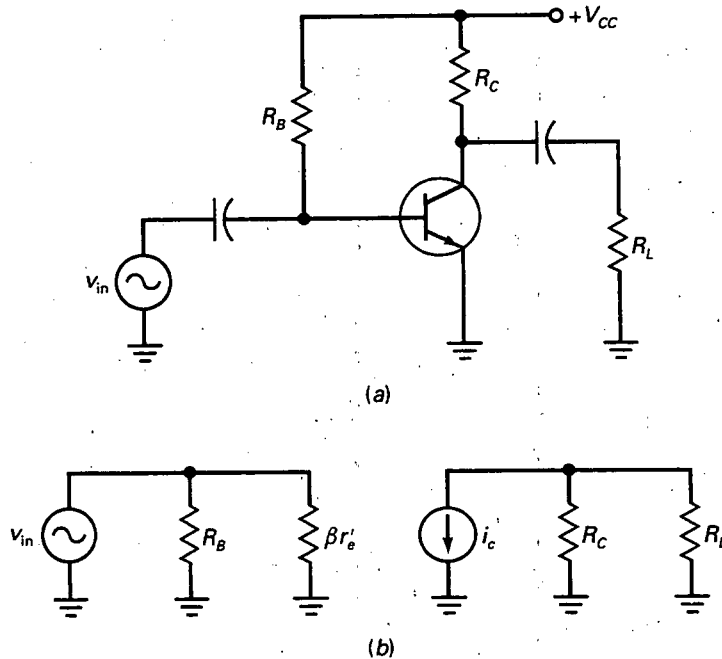


Figura 9-19. a) Amplificador con polarización de base; b) circuito equivalente para señal.

□ Amplificador PEDF

Nuestro último ejemplo es el amplificador con polarización de emisor con dos fuentes de la Figura 9-21a. Después de analizar el circuito equivalente para continua podemos dibujar el circuito equivalente para señal de la Figura 9-21b.

De nuevo, todos los condensadores se han cortocircuitado, la fuente de tensión continua se ha convertido en una masa para señal y el transistor se ha sustituido por su modelo π . En el circuito de base la tensión alterna de entrada aparece a través de R_B en paralelo con $\beta r'_e$.

En el circuito de colector, la fuente de corriente bombea una corriente alterna i_c a través de R_C en paralelo con R_L .

□ Amplificadores en emisor común (EC)

Los tres diferentes amplificadores de las Figuras 9-19, 9-20 y 9-21 son ejemplos de un amplificador en emisor común (EC). Se puede reconocer inmediatamente un amplificador en EC porque su emisor es una masa para señal.

En un amplificador en EC la señal alterna de entrada se acopla a la base y la señal amplificada aparece en el colector.

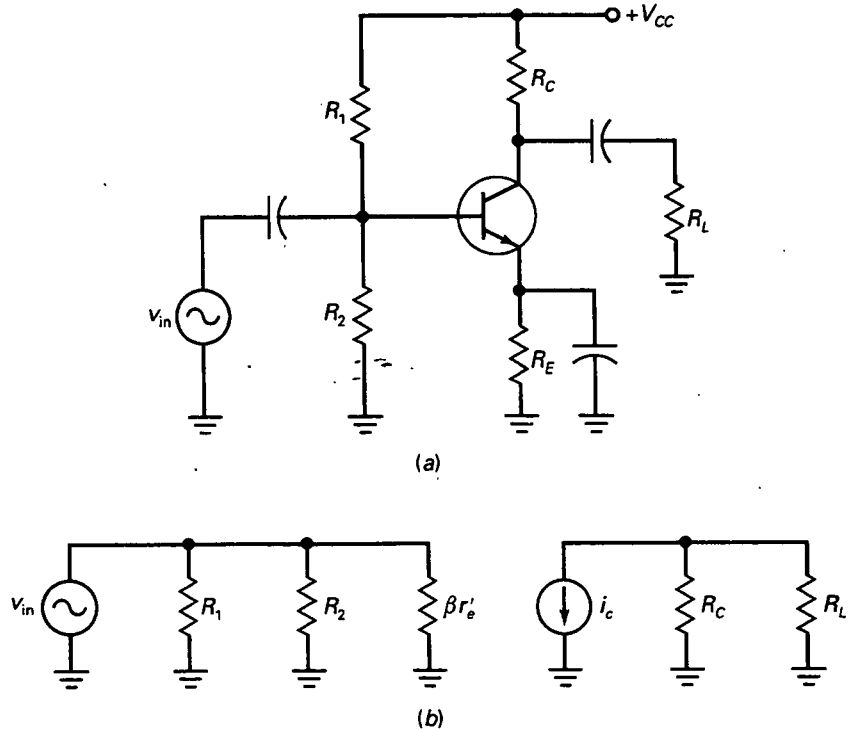


Figura 9-20. a) Amplificador PDT; b) circuito equivalente para señal.

Son posibles otros dos tipos básicos de transistores amplificadores. El amplificador en base común (BC) y el amplificador en colector común (CC). El amplificador BC tiene su base a masa para señal y el amplificador CC tiene su colector a masa para señal. Son útiles en algunas aplicaciones pero no tan populares como el amplificador EC. En capítulos posteriores analizaremos los amplificadores BC y CC.

❑ Ideas principales

El anterior método de análisis funciona para todos los amplificadores. Se empieza por un circuito equivalente para continua. Después de calcular las tensiones y corrientes continuas, se analiza el circuito equivalente para señal. Las ideas clave para obtener el circuito equivalente para señal son:

1. Cortocircuitar todos los condensadores de acoplo y desacoplo.
2. Imaginar todas las fuentes de tensión continuas como masas para señal.
3. Sustituir el transistor por su modelo π o T.
4. Dibujar el circuito equivalente para señal.

Los siguientes Capítulos emplearán este método para calcular la ganancia de tensión, la impedancia de entrada y otras características de los amplificadores.

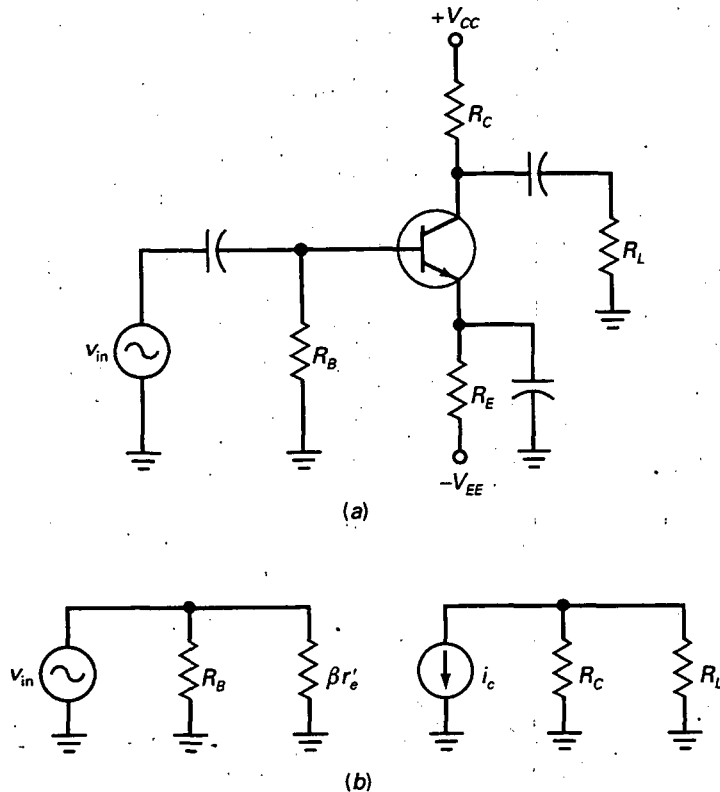


Figura 9-21. a) Amplificador; b) circuito equivalente para señal.

9-8. PARÁMETROS PARA SEÑAL EN LAS HOJAS DE CARACTERÍSTICAS

En la siguiente explicación se hará referencia a la hoja de características del 2N3904 que aparece en el Apéndice. Los valores para señal aparecen en la sección titulada «Características para pequeña señal». En esa sección se hallarán cuatro nuevos parámetros denominados h_{fe} , h_{ie} , h_{re} y h_{oe} , que reciben el nombre de parámetros h . ¿Qué indican estos parámetros?

□ Parámetros h

Cuando se inventó el transistor, se utilizó el modelo conocido como de los parámetros h para analizar y diseñar circuitos con transistores. Se trata de un enfoque matemático mediante el cual se diseña el transistor considerando lo que sucede en sus terminales y sin tener en cuenta los procesos físicos que pueden ocurrir dentro del mismo.

Un enfoque más práctico es el que hemos empleado hasta ahora. Se le llama método del parámetro r' y emplea cantidades como β y r'_e . Con esta perspectiva se pueden usar la ley de Ohm y otros conceptos básicos en el análisis y diseño de circuitos de transistores. Por ello, los parámetros r' son los preferidos por los profesionales de la electrónica.

Tal hecho no implica que los parámetros h no sirvan. Han sobrevivido en las hojas de características porque son más fáciles de medir que los parámetros r' . Estos últimos no se hallan en las hojas de características. En vez de ellos, lo que se encuentra son los valores de h_{fe} , h_{ie} , h_{re} y h_{oe} . Los cuatro parámetros h proporcionan información útil cuando se convierten en los parámetros r' .

□ Relaciones entre los parámetros r y h

Por ejemplo, el h_{fe} , dado en la sección «Características para pequeña señal» del Apéndice, es idéntico a la ganancia de corriente para señal. En símbolos se representa por:

$$\beta = h_{fe}$$

En la hoja de características se incluye un h_{fe} mínimo de 100 y uno máximo de 400. Por tanto, β puede ser tan bajo como 100 o tan elevado como 400. Estos valores se refieren a una corriente de colector de 1 mA y a una tensión colector-emisor igual a 10 V.

Otro parámetro h es el h_{ie} . Las hojas de características dan un h_{ie} mínimo de 1 k Ω y un máximo de 10 k Ω . Su relación con los parámetros r' es la siguiente:

$$r'_e = \frac{h_{ie}}{h_{fe}} \quad (9-13)$$

Por ejemplo, los valores máximos de h_{ie} y h_{fe} son 10 k Ω y 400. Así,

$$r'_e = \frac{10 \text{ k}\Omega}{400} = 25 \Omega$$

Los dos últimos parámetros h_{re} y h_{oe} no son necesarios ni para la localización de averías ni para el diseño básico.

□ Otros valores

Otros valores que aparecen en «Características para pequeña señal» son f_T , C_b , C_{ob} y NF. El primero, f_T , proporciona información acerca de las limitaciones en alta frecuencia para el 2N3904. El segundo y tercero, C_i y C_{ob} , son las capacidades de entrada y salida del dispositivo. El valor final, NF, es la figura de ruido; indica cuánto ruido produce el 2N3904.

En las hojas de características del 2N3904 se incluye una gran cantidad de gráficas que es conveniente revisar. Por ejemplo, la Figura 9-11 en la

hoja de características da la *ganancia de corriente*. Muestra que h_{fe} aumenta aproximadamente de 70 a 160 si la corriente de colector aumenta de 0,1 a 10 mA. Obsérvese que h_{fe} vale, aproximadamente, 125 cuando la corriente de colector es de 1 mA. Ésta es la gráfica para un 2N3904 típico a temperatura ambiente. Si se recuerda que los valores mínimo y máximo de h_{fe} son 100 y 400 se puede suponer que h_{fe} tendrá una gran variación en la producción en serie. También hay que recordar que h_{fe} varía con la temperatura.

Examine la Figura 9-13 que aparece en la hoja de características del 2N3904. Obsérvese cómo h_{ie} disminuye aproximadamente de 20 k Ω a 500 Ω cuando la corriente de colector aumenta de 0,1 a 10 mA. La Ecuación (9-13) indica cómo calcular r'_e . Hay que dividir h_{ie} entre h_{fe} para obtener r'_e . Intentémoslo. Si se leen los valores de h_{ie} y h_{fe} para una corriente de colector de 1 mA de las Figuras 9-11 y 9-13 en las hojas de características, se obtendrán estos valores aproximados: $h_{fe} = 125$ y $h_{ie} = 3,6$ k Ω . Con la Ecuación (9-13):

$$r'_e = \frac{3,6 \text{ k}\Omega}{125} = 28,8 \Omega$$

El valor ideal de r'_e es:

$$r'_e = \frac{25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 25 \Omega$$

AMBAS AL ESTUDIO

RESUMEN

Sección 9-1. Amplificador con polarización de base

Un buen acoplamiento sucede cuando la reactancia del condensador de acoplo es mucho menor que la resistencia a la frecuencia más baja de la fuente de señal. En un amplificador con polarización de base, la señal de entrada se acopla a la base. Esto produce una tensión alterna de colector. Después, la tensión alterna de colector amplificada e invertida se acopla a la resistencia de carga.

Sección 9-2. Amplificador con polarización y de emisor

Un buen desacoplamiento sucede cuando la reactancia del condensador de desacoplo es mucho menor que la resistencia a la frecuencia más baja de la fuente de señal. El punto desacoplado es una masa para señal. Tanto con amplificadores PDT como PEDF, la señal se acopla a la base. La señal amplificada se acopla después a la resistencia de carga.

Sección 9-3. Funcionamiento para pequeña señal

La tensión de la base tiene una componente continua y una componente alterna. Esto condiciona unas compo-

nentes continua y alterna de la corriente de emisor. Una forma de evitar la distorsión excesiva consistiría en funcionar para pequeña señal. Esto significa mantener la corriente alterna de emisor pico a pico menor que un décimo de la corriente continua de emisor.

Sección 9-4. Ganancia para señal

La ganancia para señal de un transistor se define como la corriente alterna de colector dividida por la corriente alterna de base. Los valores de la ganancia para señal normalmente difieren sólo un poco de los valores de la ganancia para continua. Cuando se detectan averías, se puede usar el mismo valor para ambas ganancias. En las hojas de características, h_{FE} es equivalente a β_{dc} y h_{fe} es equivalente a β .

Sección 9-5. Resistencia para señal del diodo emisor

La tensión base-emisor de un transistor tiene una componente continua V_{BEQ} y una componente alterna v_{be} . La tensión alterna base-emisor provoca una corriente alterna de emisor de i_e . La resistencia para señal del diodo emisor se define como v_{be} dividido por i_e . Matemáticamente se puede demostrar que la resistencia

330 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

para señal del diodo emisor es igual a 25 mV dividida por la corriente de emisor.

Sección 9-6. Dos modelos de transistores

Por lo que concierne a las señales de alterna, un transistor se puede sustituir por cualquiera de estos dos circuitos equivalentes: el modelo π o el modelo T. El modelo π indica que la impedancia de entrada de la base es $\beta r'_e$.

Sección 9-7. Cómo analizar un amplificador

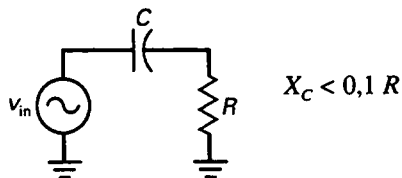
La forma más simple de analizar un amplificador consiste en dividir el análisis en dos partes: un análisis para continua y un análisis para señal. En el análisis para continua los condensadores están abiertos. En el análisis para señal los condensadores están cortocircuitados y las fuentes continuas son masas para señal.

Sección 9-8. Valores para señal en las hojas de características

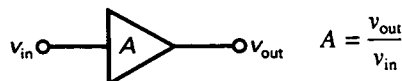
Los parámetros h se usan en las hojas de características porque son más fáciles de medir que los parámetros r' . Los parámetros r' son más fáciles de usar en el análisis porque podemos utilizar la ley de Ohm y otras ideas básicas. Los valores más importantes de las hojas de características son h_{fe} y h_{ie} . Estos se pueden convertir fácilmente a β y r'_e .

DEFINICIONES

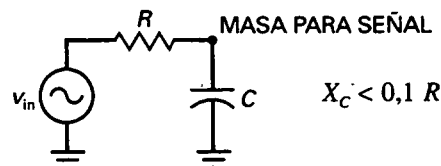
(9-1) Buen acoplamiento:



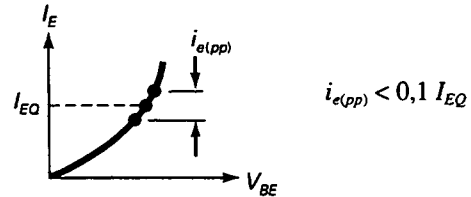
(9-2) Ganancia de tensión:



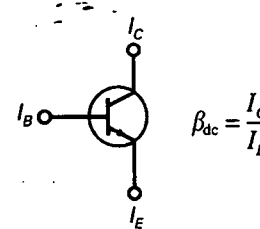
(9-5) Buen desacoplamiento:



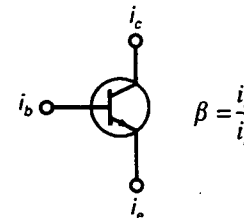
(9-6) Pequeña señal:



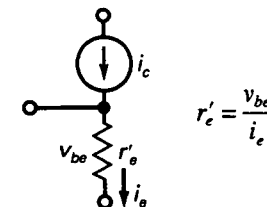
(9-7) Ganancia de corriente continua:



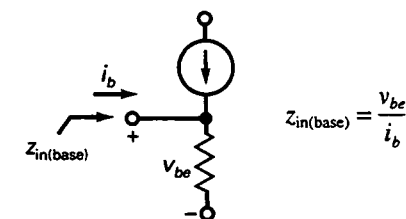
(9-8) Ganancia de corriente para señal:



(9-9) Resistencia para señal:

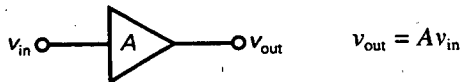


(9-11) Impedancia de entrada:

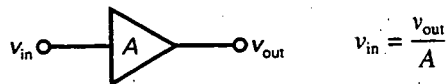


DERIVACIONES

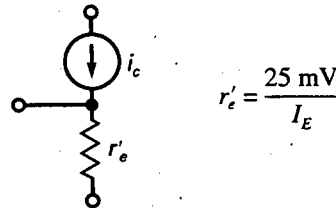
(9-3) Tensión alterna de salida:



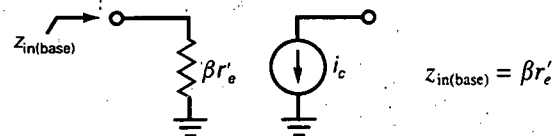
(9-4) Tensión alterna de entrada:



(9-10) Resistencia para señal:



(9-12) Impedancia de entrada:

 **EJERCICIOS PARA EL ALUMNO****CUESTIONES**

- Para continua, la corriente en un circuito de acople es
 - Cero
 - Máxima
 - Mínima
 - El valor medio
- A frecuencias altas la corriente en un circuito de acople es:
 - Cero
 - Máxima
 - Mínima
 - El valor medio
- Un condensador es
 - Un circuito abierto para continua
 - Un cortocircuito para señal
 - Un cortocircuito para continua y un circuito abierto para señal
 - Un circuito abierto para continua y un cortocircuito para señal
- En un circuito de desacople, la parte superior del condensador es
 - Un circuito abierto
 - Un cortocircuito
 - Una masa para señal a frecuencias altas
 - Una masa física
- Al condensador que produce una masa para señal se le llama
 - Condensador de desacople
 - Condensador de acople
 - Condensador
 - Circuito abierto para señal
- Los condensadores de un amplificador en EC aparecen:
 - En circuito abierto para señal
 - En cortocircuito para continua
 - En circuito abierto para la tensión de la fuente
 - En cortocircuito para señal
- Anular todas las fuentes de continua es uno de los pasos para obtener
 - El circuito equivalente para continua
 - El circuito equivalente para señal
 - El circuito amplificador completo
 - El circuito polarizado por medio de un divisor de tensión
- El circuito equivalente para señal se deriva del circuito original poniendo en cortocircuito todas
 - Las resistencias
 - Los condensadores
 - Las inductancias
 - Los transistores
- Si la tensión alterna en la base es demasiado grande, la corriente alterna de emisor es
 - Sinusoidal
 - Constante
 - Distorsionada
 - Alternante
- En un amplificador en EC con una señal de entrada grande el semiciclo positivo de la corriente alterna de emisor es:
 - Igual al semiciclo negativo
 - Menor que el semiciclo negativo
 - Mayor que el semiciclo negativo
 - Igual al semiciclo negativo
- La resistencia para señal de emisor es igual a 25 mV dividido entre
 - La corriente de polarización de base
 - La corriente continua de emisor
 - La corriente alterna de emisor
 - La variación en la corriente de colector

332 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

12. Para disminuir la distorsión en un amplificador en EC se debe reducir
 - a) La corriente continua de emisor
 - b) La tensión base-emisor
 - c) La corriente de colector
 - d) La tensión alterna en la base
13. Si la tensión alterna en el diodo de emisor es de 1 mV y la corriente alterna de emisor es de 100 μ A, la resistencia para señal del diodo de emisor es
 - a) 1 Ω
 - b) 10 Ω
 - c) 100 Ω
 - d) 1 k Ω
14. Una curva de la corriente alterna de emisor en función de la tensión alterna base-emisor se aplica
 - a) Al transistor
 - b) Al diodo de emisor
 - c) Al diodo de colector
 - d) A la fuente de alimentación
15. La tensión de salida de un amplificador en EC
 - a) Está amplificada
 - b) Está invertida
 - c) Está desfasada 180° respecto a la entrada
 - d) Todas las anteriores
16. El emisor en un amplificador en EC no tiene tensión alterna debido
 - a) A que tiene una tensión continua
 - b) Al condensador de desacoplo
 - c) Al condensador de acoplo
 - d) A la resistencia de carga
17. La tensión en la resistencia de carga de un amplificador en EC es
 - a) Continua y alterna
 - b) Sólo continua
 - c) Sólo alterna
 - d) Ni continua ni alterna
18. La corriente alterna de colector es aproximadamente igual a la corriente alterna
 - a) De base
 - b) De emisor
 - c) De la fuente
 - d) Del generador
19. La resistencia para señal de emisor multiplicada por la corriente alterna de emisor es igual a
 - a) La tensión continua de emisor
 - b) La tensión alterna de la base
 - c) La tensión alterna del colector
 - d) La tensión de la fuente
20. La corriente alterna de colector es igual a la corriente alterna de base multiplicada por
 - a) La resistencia para señal de colector
 - b) La ganancia de corriente continua
 - c) La ganancia de corriente alterna
 - d) La tensión del generador

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

1. ¿Por qué se usan los condensadores de acoplo y desacoplo?

2. Quiero que dibuje un amplificador con polarización de base y dibuje formas de onda. Después, quiero que explique cómo amplifica el circuito y por qué las diferentes formas de onda tienen los niveles de tensión continua y alterna que ha mostrado en sus dibujos.
3. Quiero que dibuje un amplificador PDT y formas de onda. Después, explíqueme las diferentes formas de onda.
4. Dígame todo lo que sabe sobre la resistencia para señal del diodo emisor.
5. Explique qué significa funcionamiento para pequeña señal. Incluya dibujos en su explicación.
6. Dibuje los dos modelos para señal de un transistor que se comentaron en este capítulo. Explique cómo se usan.
7. ¿Por qué es importante polarizar un transistor cerca del medio de la recta de carga para señal?
8. ¿Por qué se usan los modelos para señal para transistores y cuáles son los dos más usados?
9. Compare y contraste los condensadores de acoplo y desacoplo.
10. ¿Cuál es la diferencia entre β y β_{ac} ?
11. Si tiene un circuito PDT y la resistencia de colector se abre, ¿qué podría sucederle a la tensión alterna de salida?

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 9-1. Amplificador con polarización de base

- 9-1. En la Figura 9-22, ¿cuál es la frecuencia más baja para la que existe un buen acoplamiento?

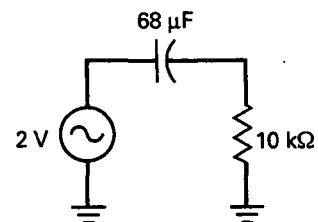


Figura 9-22

- 9-2. Si la resistencia de carga se cambia a 1 k Ω en la Figura 9-22, ¿cuál es la frecuencia más baja para la que existe un buen acoplamiento?
- 9-3. Si el condensador se cambia a 220 μ F en la Figura 9-22, ¿cuál es la frecuencia más baja para un buen acoplamiento?

Sección 9-2. Amplificador con polarización y de emisor

- 9-4. En la Figura 9-23, ¿cuál es la frecuencia más baja para la cual existe un buen desacoplamiento?

- 9-5. Si la resistencia en serie se cambia a $10\text{ k}\Omega$ en la Figura 9-23, ¿cuál es la frecuencia más baja para un buen desacoplamiento?
- 9-6. Si el condensador se cambia a $1.000\text{ }\mu\text{F}$ en la Figura 9-23, ¿cuál es la frecuencia más baja para un buen desacoplamiento?

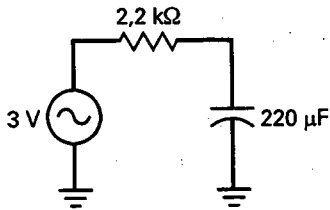


Figura 9-23

Sección 9-3. Funcionamiento para pequeña señal

- 9-7. Si queremos funcionamiento para pequeña señal en la Figura 9-24, ¿cuál es la máxima corriente alterna permisible en el emisor?
- 9-8. La resistencia de emisor de la Figura 9-24 se duplica. Si queremos funcionamiento para pequeña señal en la Figura 9-24, ¿cuál es la máxima corriente alterna permisible en el emisor?

Sección 9-4. Ganancia para señal

- 9-9. Si una corriente alterna de base de $50\text{ }\mu\text{A}$ produce una corriente alterna de colector de $7,5\text{ mA}$, ¿cuál es la ganancia de señal?
- 9-10. Si la ganancia de señal es 240 y la corriente alterna de base es $12,5\text{ }\mu\text{A}$, ¿cuál es la corriente alterna de colector?
- 9-11. Si la corriente alterna de colector es 4 mA y la ganancia de señal es 300, ¿cuál es la corriente alterna de base?

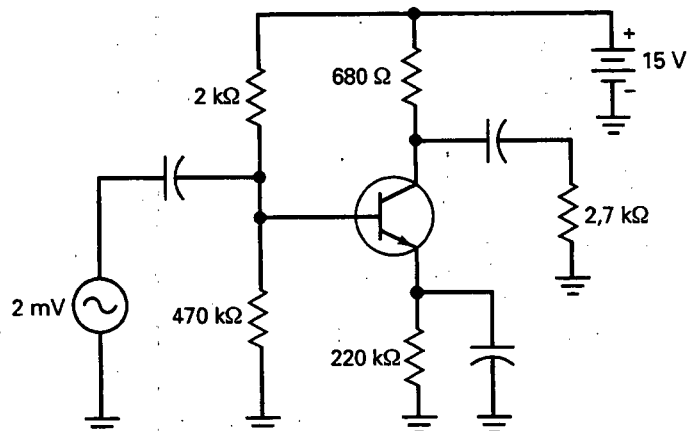


Figura 9-24

Sección 9-5. Resistencia para señal del diodo emisor

- 9-12. ¿Cuál es la resistencia para señal del diodo de emisor en la Figura 9-24?
- 9-13. Si la resistencia de emisor de la Figura 9-24 se duplica, ¿cuál es la resistencia para señal del diodo emisor?

Sección 9-6. Dos modelos de transistores

- 9-14. ¿Cuál es la impedancia de entrada de la base en la Figura 9-24 si $\beta = 250$?
- 9-15. Si la resistencia de emisor se duplica en la Figura 9-24, ¿cuál es la impedancia de entrada de la base con $\beta = 250$?
- 9-16. Si la resistencia de $680\text{ }\Omega$ se cambia a $330\text{ }\Omega$ en la Figura 9-24, ¿cuál es la impedancia de entrada de la base si $\beta = 250$?

Sección 9-7. Cómo analizar un amplificador

- 9-17. Dibuje el circuito equivalente para señal para la Figura 9-24 con $\beta = 175$.
- 9-18. Duplique todas las resistencias en la Figura 9-24. Después dibuje el circuito equivalente para señal para una ganancia de señal de 200.

Sección 9-8. Valores para señal en las hojas de características

- 9-19. ¿Cuáles son los valores máximos y mínimos que aparecen en la sección «Características para pequeña señal» en el Apéndice para h_{fe} de un 2N3904? ¿Para qué corriente de colector se dan estos valores? ¿Para qué temperatura se dan estos valores?
- 9-20. Consulte la hoja de características del 2N3904 para lo siguiente. ¿Cuál es el valor típico de r' ?

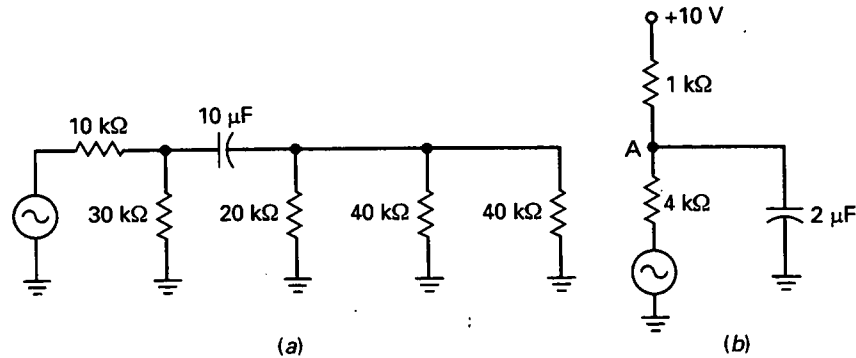


Figura 9-25

que se puede calcular a partir del parámetro h si el transistor funciona con una corriente de colector de 5 mA? ¿Es este valor más pequeño o más grande que el valor ideal de r_e calculado como $25 \text{ mV}/I_E$?

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 9-21. Alguien ha construido el circuito que se muestra en la Figura 9-22. Esa persona no se puede explicar por qué mide una tensión continua muy pequeña en la resistencia de $8,2 \text{ k}\Omega$ cuando el generador está a 2 V y frecuencia cero. ¿Puede el lector explicar qué está sucediendo en ese circuito?
- 9-22. Suponga que está en el laboratorio probando el circuito de la Figura 9-23. A medida que aumenta la frecuencia del generador la tensión en el nudo A disminuye hasta que ya no es posible medirla. Si continúa aumentando la frecuencia por encima de los 10 MHz, la tensión en el nudo A empieza a aumentar. ¿Puede explicar qué es lo que sucede?

- 9-23. En la regla para un buen acoplamiento, R representa todas las resistencias que están en serie con el condensador de acoplo. Con esta ayuda en mente, ¿cuál es la frecuencia más baja para un buen acoplamiento en la Figura 9-25a?
- 9-24. ¿Cuál es la frecuencia más baja para un buen desacoplamiento en la Figura 9-25b? (Ayuda: Resistencia de Thevenin.)
- 9-25. En el amplificador de dos etapas de la Figura 9-26, ¿cuál es la impedancia de entrada de la primera base si la ganancia de corriente en alterna es 250? Si el segundo transistor tiene $\beta = 100$, ¿cuál es la impedancia de entrada de la segunda base?
- 9-26. Dibuje el circuito equivalente para señal para la Figura 9-26 usando $\beta = 200$ para ambos transistores.
- 9-27. En la Figura 9-24, la resistencia Thevenin vista por el condensador de desacoplo es 30 ohmios. Si el emisor se supone que es una masa para señal para frecuencias de 20 Hz a 20 kHz, ¿qué valor debería tener el condensador de desacoplo?

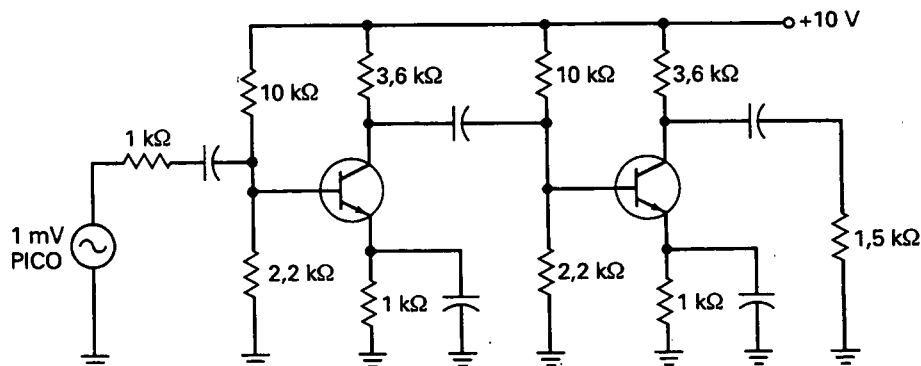


Figura 9-26

Amplificadores de tensión

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Conocer las características principales del amplificador en emisor común.
- Saber calcular la ganancia de tensión y predecir la ganancia de tensión de un amplificador en emisor común.
- Explicar el funcionamiento de un amplificador con resistencia de emisor sin desacoplar y enumerar tres ventajas que tenga.
- Dibujar un esquema de un amplificador constituido por dos etapas en emisor común conectadas en cascada.
- Enumerar dos problemas provocados por condensadores que pueden producirse en un amplificador en emisor común.

VOCABULARIO

- | | | |
|--|--------------------------------|---|
| • acoplo | • cascada | • realimentación de emisor en corriente alterna |
| • amplificador EC con resistencia de emisor sin desacoplar | • ganancia de tensión | • resistencia de colector en corriente alterna |
| • amplificador multietapa | • ganancia de tensión total | • resistencia de realimentación |
| | • realimentación de dos etapas | |

En este capítulo se continúa con el estudio de los amplificadores en EC y se muestra cómo se calcula la ganancia de tensión y las tensiones en alterna de los circuitos equivalentes. Esto es importante para la detección de averías porque puede medir las tensiones de alterna para ver si concuerdan con los valores teóricos. Este capítulo también estudia la impedancia de entrada, amplificadores multietapa y la realimentación negativa.

10-1. GANANCIA DE TENSIÓN

La Figura 10-1a muestra un amplificador polarizado con divisor de tensión (PDT). La ganancia de corriente estaba definida como la tensión en alterna de salida dividido por la tensión en alterna de entrada. Con esta definición, podemos obtener otra ecuación de la ganancia de tensión comúnmente usada en detección de averías.

□ Transformación al modelo π

La Figura 10-1b muestra el circuito equivalente de alterna utilizando el modelo π del transistor. La corriente alterna de base i_b circula a través de la impedancia de entrada de la base ($\beta r_e'$).

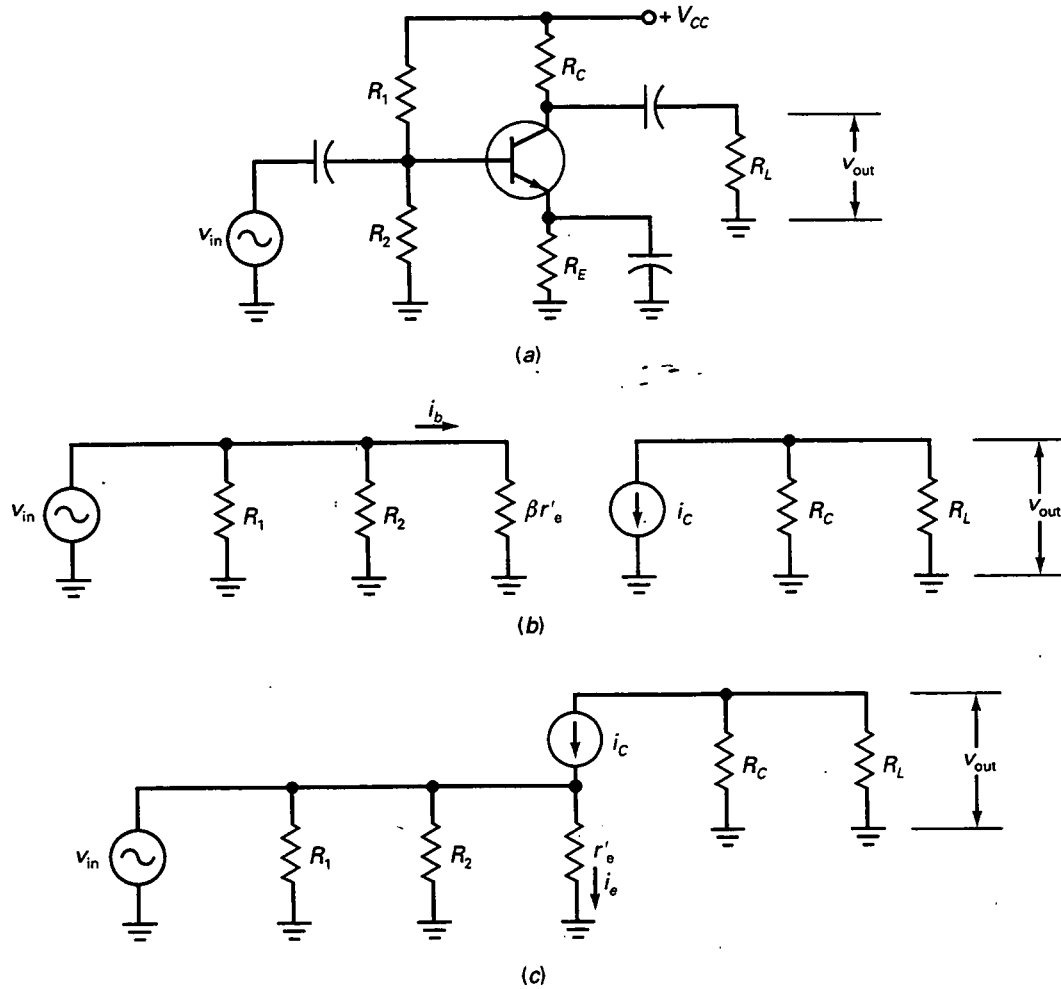


Figura 10-1. a) Amplificador EC; b) circuito π equivalente para corriente alterna; c) circuito T equivalente para corriente alterna.

Siguiendo la ley de Ohm, podemos escribir:

$$v_{in} = i_b \beta r'_e$$

En el circuito de colector, la fuente de corriente bombea una corriente alterna i_c a través de la conexión en paralelo de R_C y R_L . De esta forma, la tensión de alterna de salida es:

$$v_{out} = i_c (R_C \parallel R_L) = \beta i_b (R_C \parallel R_L)$$

Ahora, podemos dividir v_{out} entre v_{in} para obtener:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\beta i_b (R_C \parallel R_L)}{i_b \beta r'_e}$$

y simplificando:

$$A = \frac{(R_C \parallel R_L)}{r'_e} \quad (10-1)$$

□ Resistencia de colector para corriente alterna

En la Figura 10-1b, la resistencia total de carga en alterna vista desde el colector es el paralelo de R_C y R_L . Esta resistencia equivalente se llama *resistencia de colector para corriente alterna*, r_c . Por definición:

$$r_c = R_C \parallel R_L \quad (10-2)$$

Ahora podemos reescribir la Ecuación (10-1) como:

$$A = \frac{r_c}{r'_e} \quad (10-3)$$

Resumiendo: la ganancia de tensiones igual a la resistencia de colector para corriente alterna dividido por la resistencia del diodo emisor para corriente alterna.

□ Transformación al modelo en T

Cualquier modelo de transistor da los mismos resultados. Más tarde, usaremos el modelo en T para analizar amplificadores diferenciales. En la práctica, obtendremos la ecuación de la ganancia de tensión usando el modelo T.

La Figura 10-1c muestra el circuito equivalente en alterna del transistor usando el modelo en T. La tensión de entrada v_{in} aparece cruzando r'_e . Por la ley de Ohm, escribiremos:

$$v_{in} = i_e r'_e$$

En el circuito de colector, la fuente de corriente bombea una corriente alterna i_c a través de la resistencia de colector en alterna. De esta forma, la tensión de alterna de salida es:

$$v_{out} = i_c r_c$$

Ahora, podemos dividir v_{out} entre v_{in} para obtener:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{i_c r_c}{i_e r'_e}$$

Como $i_c \approx i_e$, podemos simplificar la ecuación para llegar a:

$$A = \frac{r_c}{r'_e}$$

Ésta es la misma ecuación obtenida en el modelo π . Se aplica a todos los amplificadores en emisor común (EC) porque todos tienen una resistencia de colector en alterna de r_c y una resistencia de diodo emisor en alterna de r_e .

EJEMPLO 10-1

¿Cuál es la ganancia de corriente en la Figura 10-2a? ¿Y la tensión de salida en la resistencia de carga?

SOLUCIÓN

La resistencia de colector en alterna es:

$$r_c = R_C \parallel R_L = (3,6 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega) = 2,65 \text{ k}\Omega$$

En el Ejemplo 9-2, calculamos una r_e de $22,7 \Omega$. Así, la ganancia de tensión es:

$$A = \frac{r_c}{r_e} = \frac{2,65 \text{ k}\Omega}{22,7 \Omega} = 117$$

La tensión de salida vale:

$$V_{out} = A V_{in} = (117)(2 \text{ mV}) = 234 \text{ mV}$$

EJEMPLO 10-2

¿Cuál es la ganancia de corriente en la Figura 10-2b? ¿Y la tensión de salida en la resistencia de carga?

SOLUCIÓN

La resistencia de colector en alterna vale:

$$r_c = R_C \parallel R_L = (3,6 \text{ k}\Omega \parallel 2,2 \text{ k}\Omega) = 1,37 \text{ k}\Omega$$

La corriente de emisor en continua es aproximadamente:

$$I_E = \frac{9 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 0,83 \text{ mA}$$

La resistencia de diodo emisor en alterna es:

$$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{0,83 \text{ mA}} = 30 \Omega$$

La ganancia en tensión:

$$A = \frac{r_c}{r_e} = \frac{1,37 \text{ k}\Omega}{30 \Omega} = 45,7$$

La tensión de salida:

$$V_{out} = A V_{in} = (45,7)(5 \text{ mV}) = 228 \text{ mV}$$

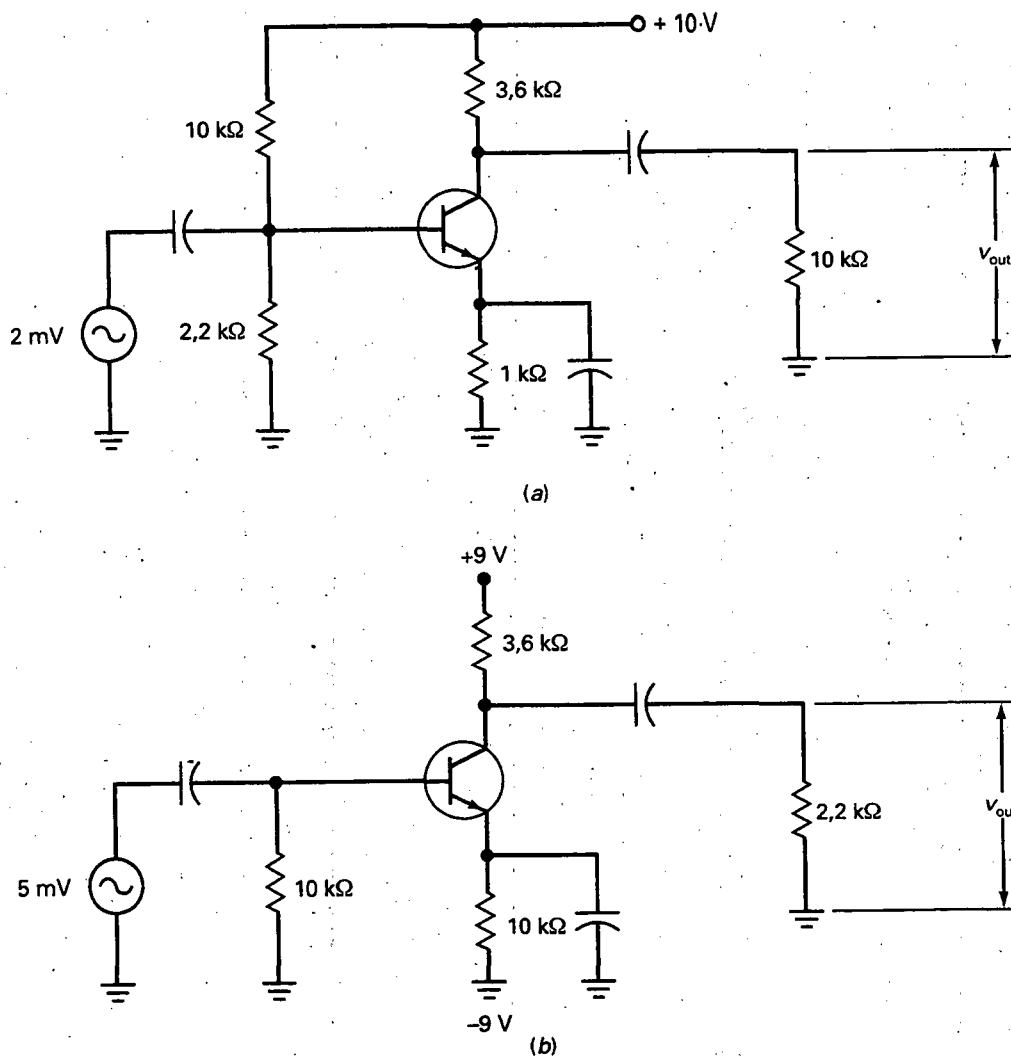


Figura 10-2. a) Ejemplo de circuito PDT; b) ejemplo de circuito PEDF.

10-2. EL EFECTO DE CARGA DE LA IMPEDANCIA DE ENTRADA

De ahora en adelante, supondremos la fuente de alimentación de corriente alterna como ideal, con resistencia cero. En esta sección discutiremos cómo la impedancia de entrada de un amplificador puede reducir la carga de la fuente de corriente alterna, esto es, reducir la tensión de la corriente alterna que aparece en el diodo emisor.

□ Impedancia de entrada

En la Figura 10-3a, una fuente de tensión de corriente alterna v_g tiene resistencia interna R_G . (El subíndice g se refiere a «generador», sinónimo de

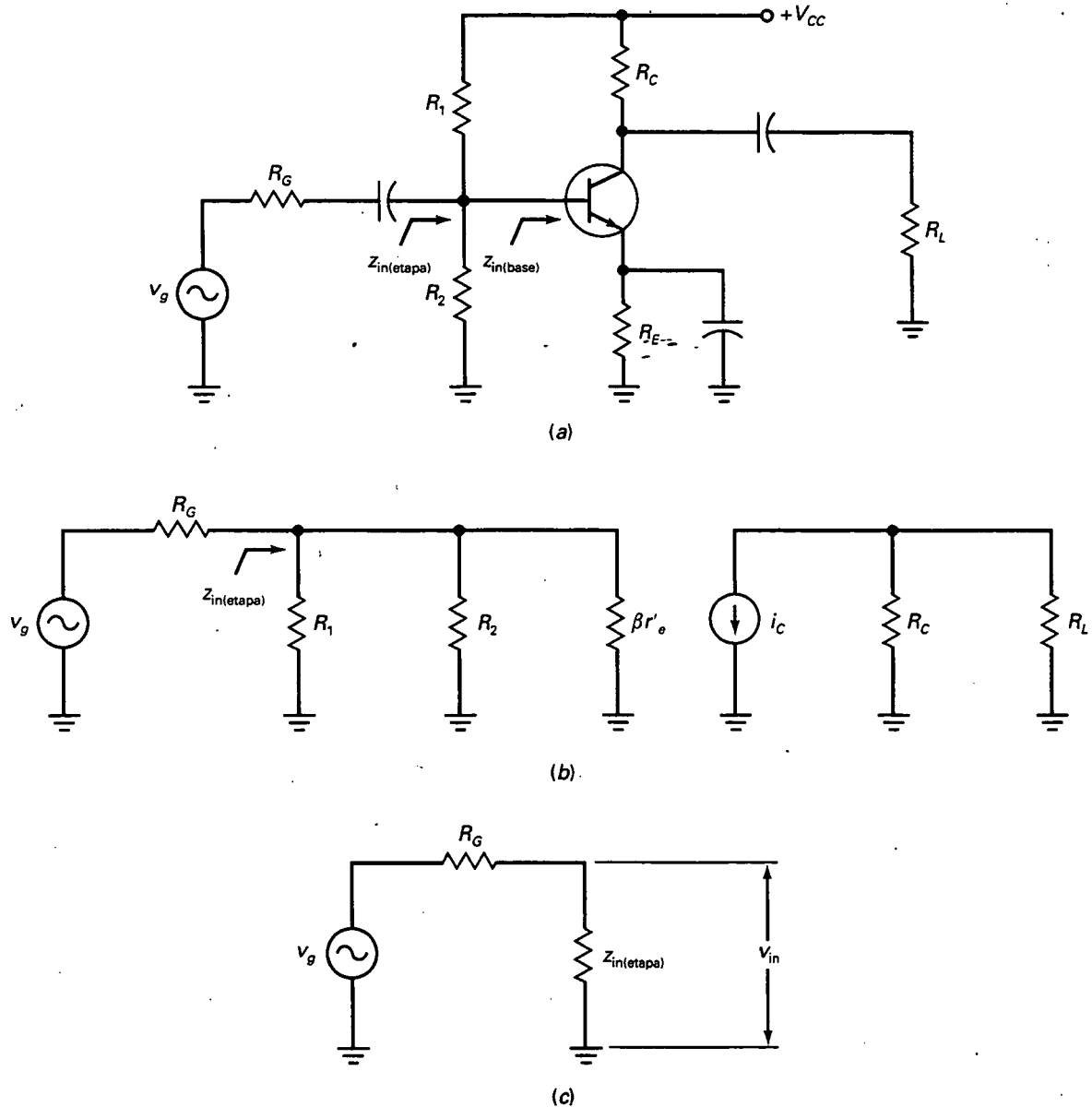


Figura 10-3. Amplificador EC. a) Circuito; b) circuito equivalente para corriente alterna; c) efecto de la impedancia de carga.

fuerza.) Cuando el generador de corriente alterna no es constante, la tensión de corriente alterna se reduce en su resistencia interna. Como resultado, la tensión de corriente alterna entre la base y tierra es menor que la ideal.

El generador de corriente alterna tiene que llevar la impedancia de entrada a la etapa $Z_{in(etapa)}$. Esta impedancia de entrada incluye los efectos de las resistencias de polarización R_1 y R_2 , en paralelo con la impedancia de entra-

da a la base $z_{in(base)}$. La Figura 10-3b ilustra la idea. La impedancia de entrada a la etapa es igual a:

$$z_{in(etapa)} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r'_e$$

□ Ecuación para la tensión de entrada

Cuando el generador no es constante, la tensión alterna de entrada v_{in} de la Figura 10-3c es menor que v_g . Siguiendo el teorema del divisor de tensión, podemos escribir:

$$v_{in} = \frac{z_{in(etapa)}}{R_G + z_{in(etapa)}} v_g \quad (10-4)$$

Esta ecuación es válida para algunos amplificadores. Después de calcular o estimar la impedancia de entrada de la etapa, se podrá determinar cuál es la tensión de entrada. *Nota:* El generador permanece constante cuando R_G es menor que $0,01z_{in(etapa)}$.

EJEMPLO 10-3

En la Figura 10-4, el generador de alterna tiene una resistencia interna de $600\ \Omega$. ¿Cuál es la tensión de salida si $\beta = 300$?

SOLUCIÓN

Aquí hay dos cantidades calculadas en ejemplos anteriores: $r'_e = 22,7\ \Omega$ y $A = 117$. Usaremos estos valores para resolver el problema.

Cuando $\beta = 300$, la impedancia de entrada de la base es:

$$z_{in(base)} = (300)(22,7\ \Omega) = 6,8\ \text{k}\Omega$$

La impedancia de la etapa vale:

$$z_{in(etapa)} = 10\ \text{k}\Omega \parallel 2,2\ \text{k}\Omega \parallel 6,8\ \text{k}\Omega = 1,42\ \text{k}\Omega$$

Con la Ecuación (10-4), podemos calcular la tensión de entrada:

$$v_{in} = \frac{1,42\ \text{k}\Omega}{600\ \Omega + 1,42\ \text{k}\Omega} 2\ \text{mV} = 1,41\ \text{mV}$$

Esta es la tensión de la corriente alterna que aparece en la base del transistor, equivalente a la tensión de alterna a través del diodo emisor. La tensión de salida del amplificador será igual a:

$$v_{out} = A v_{in} = (117)(1,41\ \text{mV}) = 165\ \text{mV}$$

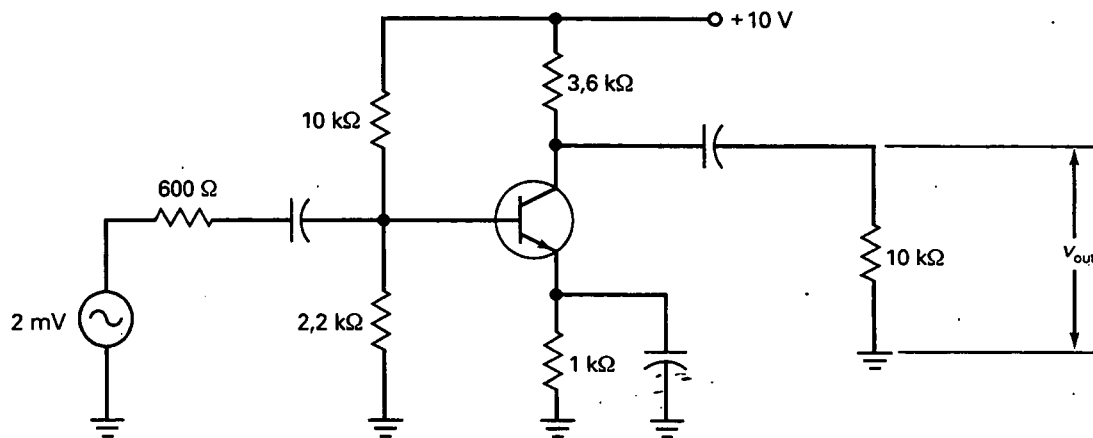


Figura 10-4. Ejemplo.

EJEMPLO 10-4

Repetir el ejemplo anterior con $\beta = 50$.

SOLUCIÓN

Cuando $\beta = 50$, la impedancia de entrada de la base decrece a:

$$Z_{in(base)} = (50)(22.7 \Omega) = 1.14 \text{ k}\Omega$$

La impedancia de la etapa decrece a:

$$Z_{in(etapa)} = 10 \text{ k}\Omega \parallel 2.2 \text{ k}\Omega \parallel 1.14 \text{ k}\Omega = 698 \Omega$$

Con la Ecuación (10-4) podemos calcular la tensión de entrada:

$$V_s = \frac{698 \Omega}{600 \Omega + 698 \Omega} 2 \text{ mV} = 1.08 \text{ mV}$$

La tensión de salida del amplificador será igual a:

$$V_{out} = A_{v_m} (1.08 \text{ mV}) = 126 \text{ mV}$$

Este ejemplo ilustra cómo la ganancia de corriente alterna del transistor puede cambiar la tensión de salida. Cuando β disminuye, la impedancia de entrada de la base disminuye, la impedancia de entrada a la etapa disminuye y la tensión de salida disminuye.

10-3. ETAPAS EN CASCADA

Para obtener una mayor ganancia de tensión, podemos unir en *cascada* dos o más etapas de amplificadores. Esto es, usar la salida de la primera etapa como entrada de la segunda etapa. De la misma manera, podríamos usar la salida de la segunda etapa como entrada de una tercera, y así sucesivamente.

□ Ganancia de tensión en la primera etapa

La Figura 10-5a muestra un amplificador de dos etapas. La señal amplificada e invertida de salida de la segunda etapa está acoplada a la resistencia de carga. La señal a través de la resistencia de carga está en fase con señal del generador. La razón es que cada etapa invierte la señal 180°. Por tanto, dos etapas invierten la señal 360°, lo que equivale a 0° (en fase).

□ Ganancia de tensión en la primera etapa

La Figura 10-5b muestra el circuito equivalente de corriente alterna. Se advierte que la impedancia de entrada de la segunda etapa carga a la primera etapa; es decir, la z_{in} de la segunda etapa está en paralelo con R_C de la primera etapa. La resistencia de colector de la primera etapa es:

$$r_c = R_C \parallel z_{in(etapa)}$$

La ganancia de tensión de esta primera etapa viene representada por:

$$A_1 = \frac{R_C \parallel z_{in(etapa)}}{r'_e}$$

□ Ganancia de tensión de la segunda etapa

La resistencia de colector de la segunda etapa es:

$$r_c = R_C \parallel R_L$$

La ganancia de tensión de la segunda etapa tiene la siguiente ecuación:

$$A_2 = \frac{R_C \parallel R_L}{r'_e}$$

□ Ganancia de tensión total

El total de la ganancia de tensión del amplificador viene dado por el producto de las ganancias individuales:

$$A = A_1 A_2 \quad (10-5)$$

Por ejemplo, si cada etapa tiene una ganancia de tensión de 50, la ganancia total es de 2.500.

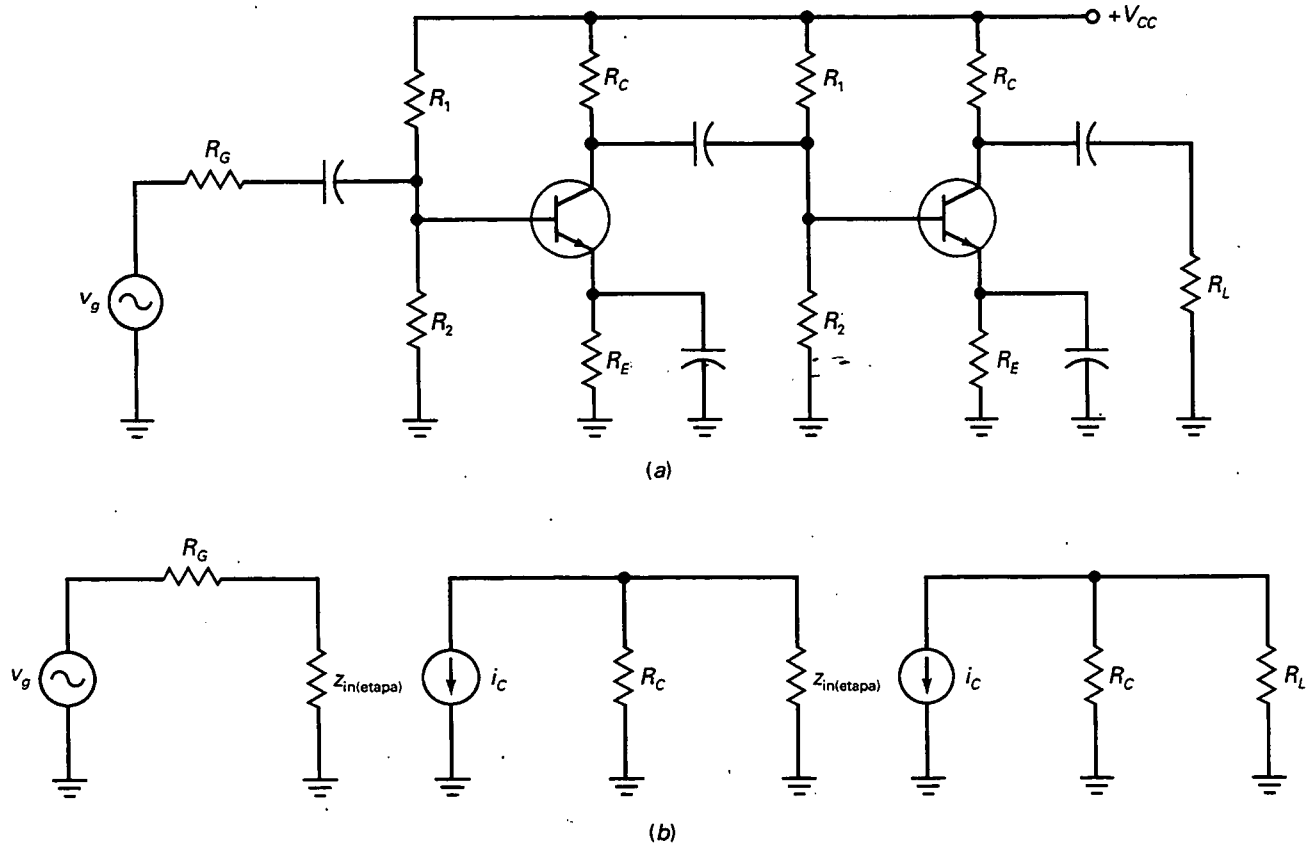


Figura 10-5. a) Amplificador de dos etapas; b) circuito equivalente para corriente alterna.

EJEMPLO 10-5

¿Cuál es la tensión de colector en alterna de la primera etapa de la Figura 10-6? ¿Y la tensión de salida en la resistencia de carga?

SOLUCION

La impedancia de entrada de la primera base es:

$$Z_{in(bas)} = (100)(22.7 \text{ k}\Omega) = 2.27 \text{ k}\Omega$$

La impedancia de entrada de la primera etapa será igual a:

$$Z_{in(etapa)} = 10 \text{ k}\Omega \parallel 2.2 \text{ k}\Omega \parallel 2.27 \text{ k}\Omega = 1 \text{ k}\Omega$$

La señal de entrada a la primera base vale:

$$V_{in} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{600 \text{ }\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ mV} = 0.625 \text{ mV}$$

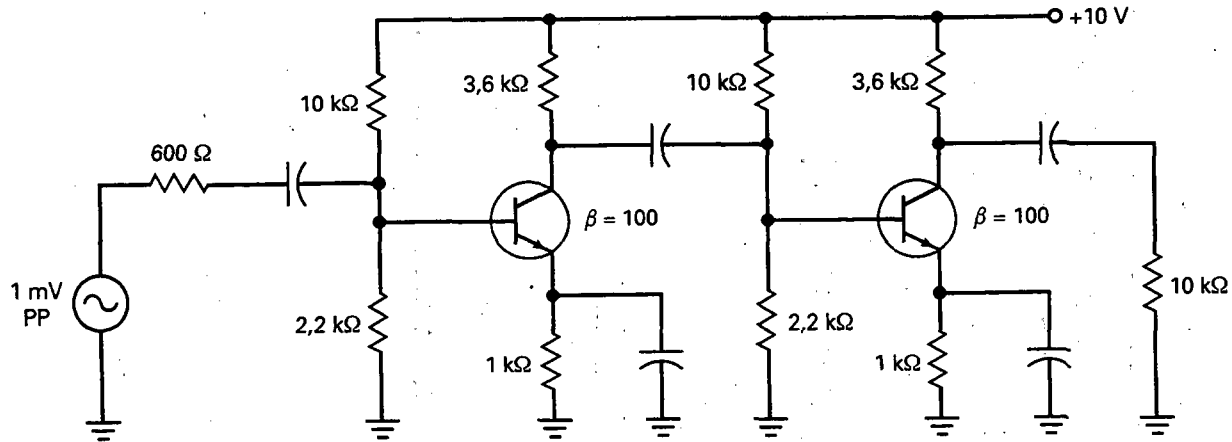


Figura 10-6. Ejemplo.

La impedancia de entrada a la segunda base es la misma que la de la primera etapa:

$$Z_{in(etapa)} = 10 \text{ k}\Omega \parallel 2,2 \text{ k}\Omega \parallel 2,27 \text{ k}\Omega \approx 1 \text{ k}\Omega$$

Esta impedancia de entrada es la resistencia de carga en la primera etapa. En otras palabras, la resistencia de colector de la primera etapa es:

$$r_c = 3,6 \text{ k}\Omega \parallel 1 \text{ k}\Omega = 783 \Omega$$

La ganancia de tensión de la primera etapa equivale a:

$$A_1 = \frac{783 \Omega}{22,7 \Omega} = 34,5$$

De esta forma, la tensión de colector en la primera etapa vale:

$$V_c = A_1 V_{in} = (34,5)(0,625 \text{ mV}) = 21,6 \text{ mV}$$

La resistencia de colector de la segunda etapa es:

$$r_c = 3,6 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega = 2,65 \text{ k}\Omega$$

y la ganancia de tensión:

$$A_2 = \frac{2,65 \text{ k}\Omega}{22,7 \Omega} = 117$$

Con lo que la tensión de salida en la resistencia de carga es:

$$V_{out} = A_2 V_{c2} = (117)(21,6 \text{ mV}) = 2,52 \text{ V}$$

Otra forma de calcular la tensión de salida final es usando la ganancia de tensión total:

$$A = (34,5)(117) = 4,037$$

La tensión de salida de la resistencia de carga es:

$$V_{out} = A V_{in} = (4,037)(0,625 \text{ mV}) = 2,52 \text{ V}$$

10-4. AMPLIFICADOR EC CON RESISTENCIA DE EMISOR SIN DESACOPLAR

La ganancia de tensión en un amplificador en EC cambia con las corrientes de polarización, las variaciones de temperatura y la sustitución del transistor porque varían los valores de r_e' y β .

□ Realimentación de emisor para corriente alterna

Una forma de estabilizar la ganancia de tensión es dejar sin desacoplar parte de la resistencia de emisor, como se muestra en la Figura 10-7a. Cuando la corriente alterna fluye a través de la resistencia de emisor sin desacoplar r_e , una tensión de alterna aparece en ella. Esto produce una realimentación negativa (descrita en el Capítulo 8). La tensión alterna en r_e se opone a los cambios en la ganancia de tensión. La resistencia de emisor sin desacoplar r_e se llama *resistencia de realimentación* porque tiene una tensión de alterna que se opone a los cambios en la ganancia de tensión.

Por ejemplo, supongamos que la corriente de colector se incrementa por un aumento de temperatura. Esto producirá una tensión de salida alta, pero de la misma manera, una tensión alta a través de r_e . Puesto que v_{be} iguala la diferencia entre v_{in} y v_e , el incremento de v_e hará decrecer v_{be} . Éste disminuirá la corriente de colector. Como esto se opone al incremento original de corriente de colector, tenemos realimentación negativa.

□ Ganancia de tensión

La Figura 10-7b muestra el circuito equivalente con el modelo en T del transistor. Vemos claramente cómo la corriente de emisor fluye a través de r_e' . Con la ley de Ohm, podemos escribir:

$$v_{in} = i_e(r_e + r_e')$$

En el circuito de colector, la fuente de corriente proporciona una corriente i_c a través de la resistencia de colector. De esta forma, la tensión de alterna de salida es:

$$v_{out} = i_c r_c$$

Ahora, dividimos v_{out} entre v_{in} y obtenemos:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{i_c r_c}{i_e(r_e + r_e')}$$

Como $i_c \approx i_e$, podemos simplificar la ecuación y llegamos a la siguiente expresión:

$$A = \frac{r_c}{r_e + r_e'} \quad (10-6)$$

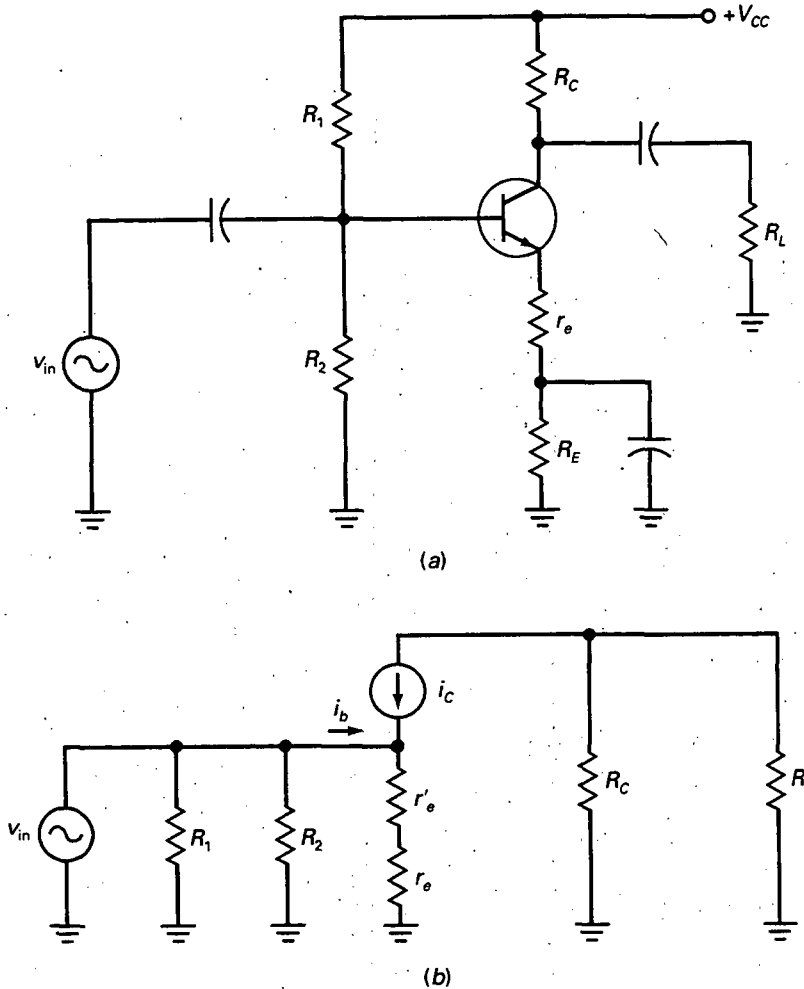


Figura 10-7. a) Amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar;
b) circuito equivalente para corriente alterna.

Cuando r_e es mucho mayor que r'_e , la ecuación anterior se simplifica a:

$$A = \frac{r_c}{r_e} \quad (10-7)$$

Esto quiere decir que la ganancia de tensión iguala a la resistencia de colector dividida por la resistencia de realimentación. Como r'_e no es lo suficientemente grande como para aparecer en la ecuación de la ganancia de tensión, no afectará a ésta.

Lo anterior es un ejemplo de amplificador EC con resistencia de emisor sin desacoplar, haciendo el primer valor mucho mayor que el segundo para eliminar cambios en éste. En la Ecuación (10-6), un valor alto de r_e minimiza las variaciones de r'_e . El resultado es una ganancia de tensión estable, sin cambios debidos a variaciones de temperatura o sustituciones del transistor.

□ Impedancia de entrada de la base

La realimentación negativa no sólo estabiliza la ganancia de tensión, también aumenta la impedancia de entrada de la base. En la Figura 10-7b, la impedancia de entrada de la base es:

$$Z_{in(base)} = \frac{v_{in}}{i_b}$$

Aplicando la ley de Ohm al diodo emisor de la Figura 10-7b, podemos escribir:

$$v_{in} = i_e(r_e + r'_e)$$

Sustituyendo esto en la ecuación primera obtenemos:

$$Z_{in(base)} = \frac{v_{in}}{i_b} = \frac{i_e(r_e + r'_e)}{i_b}$$

Como $i_c \approx i_e$, la ecuación anterior se convierte en:

$$Z_{in(base)} = \beta(r_e + r'_e) \quad (10-8)$$

En un amplificador EC con resistencia de emisor sin desacoplar esto se simplifica a:

$$Z_{in(base)} = \beta r_e \quad (10-9)$$

Esto quiere decir que la impedancia de entrada de la base es igual a r_e incrementada un número de veces igual a la ganancia de corriente.

□ Menos distorsión para señales grandes

La falta de linealidad de la curva del diodo emisor es la causa de la distorsión para señales grandes. Con el desacoplo del diodo emisor, reducimos el efecto que tiene sobre la ganancia de tensión. En consecuencia, esto reduce la distorsión que se produce al trabajar con señales grandes.

De esta manera, sin la resistencia de realimentación, la ganancia de tensión es:

$$A = \frac{r_c}{r'_e}$$

Como r'_e varía con la corriente, su valor cambia al trabajar con señales grandes. Hecho cuyo significado es que la ganancia de tensión cambia durante el ciclo de una señal grande; es decir, cambios en r'_e provocan distorsión con señales grandes.

Con la resistencia de realimentación, la ganancia de tensión es:

$$A = \frac{r_c}{r_e}$$

Como r'_e no es significativa, la distorsión de señales grandes es eliminada. El uso de realimentación negativa en el emisor de un amplificador tiene tres efectos beneficiosos: estabiliza la ganancia de tensión, incrementa la impedancia de entrada de la base y reduce la distorsión para señales grandes.

EJEMPLO 10-6

¿Cuál es la tensión de salida en la resistencia de carga de la Figura 10-8 si $\beta = 200$? Ignore r_e en los cálculos.

SOLUCIÓN

La impedancia de entrada a la base vale:

$$Z_{in(base)} = \beta r_e = (200)(180\ \Omega) = 36\ \text{k}\Omega$$

La impedancia de entrada a la etapa vale:

$$Z_{in(etapa)} = 10\ \text{k}\Omega \parallel 2,2\ \text{k}\Omega \parallel 36\ \text{k}\Omega = 1,71\ \text{k}\Omega$$

La tensión de alterna de entrada a la base es:

$$V_{in} = \frac{1,71\ \text{k}\Omega}{600\ \Omega + 1,71\ \text{k}\Omega} 50\ \text{mV} = 37\ \text{mV}$$

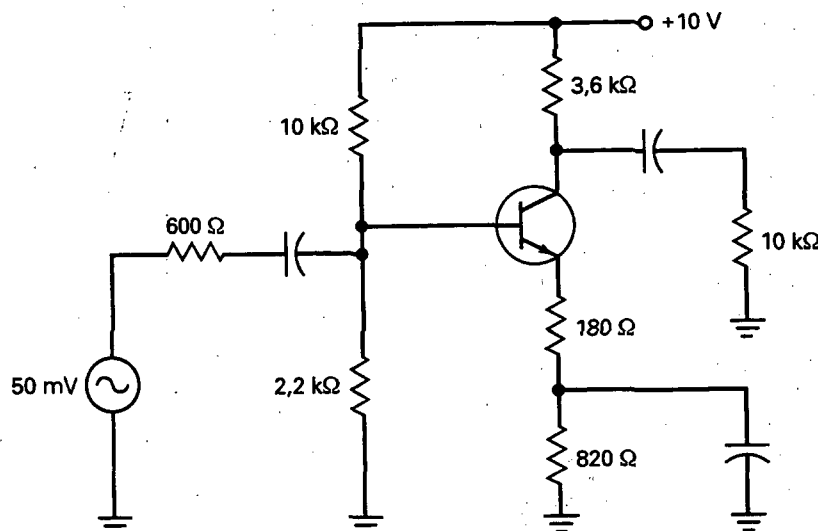


Figura 10-8. Ejemplo de una etapa.

La ganancia de tensión es:

$$A = \frac{r_c}{r_e} = \frac{2,65 \text{ k}\Omega}{180 \Omega} = 14,7$$

La tensión de salida:

$$V_{out} = (14,7)(37 \text{ mV}) = 544 \text{ mV}$$

EJEMPLO 10-7

Repetir el ejemplo anterior pero teniendo en cuenta r_e .

SOLUCIÓN

La impedancia de entrada a la base es:

$$Z_{in(base)} = \beta(r_e + r_o) = (200)(180 \Omega + 22,7 \Omega) = 40,5 \text{ k}\Omega$$

La impedancia de entrada a la etapa:

$$Z_{in(etapa)} = 10 \text{ k}\Omega \parallel 2,2 \text{ k}\Omega \parallel 40,5 \text{ k}\Omega = 1,72 \text{ k}\Omega$$

La tensión de alterna de entrada a la base vale:

$$V_{in} = \frac{1,72 \text{ k}\Omega}{600 \Omega + 1,72 \text{ k}\Omega} 50 \text{ mV} = 37 \text{ mV}$$

La ganancia de tensión vale:

$$A = \frac{r_c}{r_e + r_o} = \frac{2,65 \text{ k}\Omega}{180 \Omega + 22,7 \Omega} = 13,1$$

La tensión de salida es:

$$V_{out} = (13,1)(37 \text{ mV}) = 485 \text{ mV}$$

Comparando los resultados con y sin r_e en los cálculos, podemos ver que tiene un pequeño efecto en el resultado final. Esto es lo esperado en este tipo de amplificador. Cuando tenga que hacer un análisis de errores, puede asumir que el amplificador está desacoplado cuando se usa una resistencia de realimentación en el emisor. Si necesita más precisión, puede incluir r_e .

EJEMPLO 10-8

¿Cuál es la tensión de salida en la resistencia de carga de la Figura 10-9 si $\beta = 200$? Ignore r_e en los cálculos.

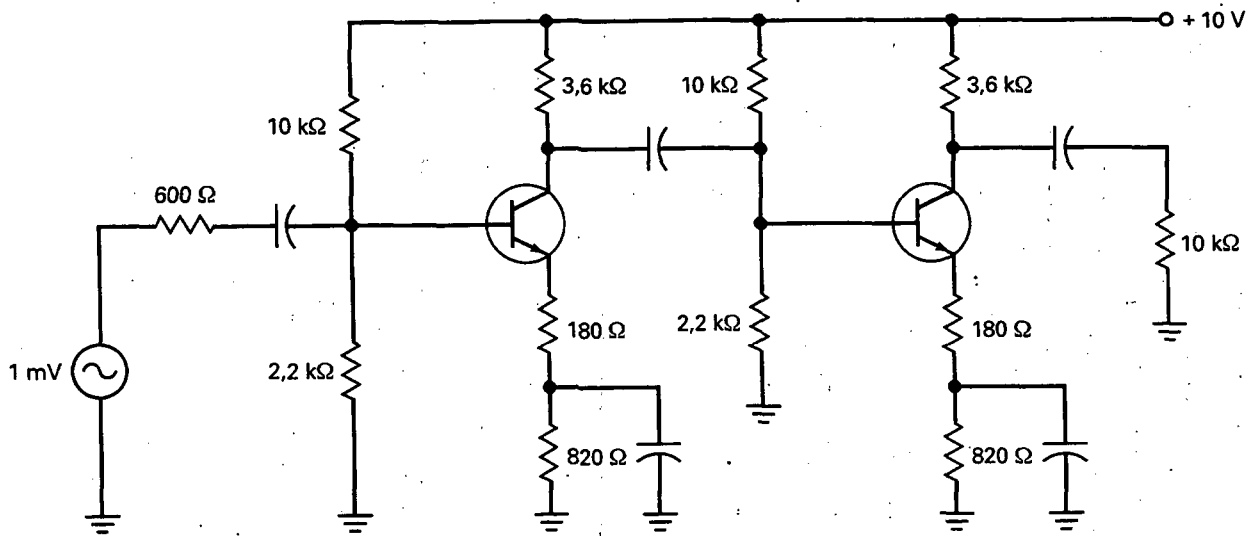


Figura 10-9. Ejemplo de amplificador de dos etapas.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 10-6 calculamos $Z_{in(base)} = 36 \text{ k}\Omega$ y $Z_{in(etapa)} = 1.71 \text{ k}\Omega$. La primera etapa tiene los mismos valores porque los datos del circuito coinciden con ese ejemplo.

La impedancia de entrada a la primera base es:

$$V_{in} = \frac{1.71 \text{ k}\Omega}{600 \Omega + 1.71 \text{ k}\Omega} 1 \text{ mV} = 0.74 \text{ mV}$$

La impedancia de entrada a la segunda etapa es la misma que la primera etapa: $Z_{in(etapa)} = 1.71 \text{ k}\Omega$. La resistencia de colector de la primera etapa será:

$$r_c = 3.6 \text{ k}\Omega \parallel 1.71 \text{ k}\Omega = 1.16 \text{ k}\Omega$$

y la ganancia de tensión de la primer etapa es:

$$A_v = \frac{1.16 \text{ k}\Omega}{180 \Omega} = 6.44$$

La tensión de alterna amplificada e invertida en el primer colector y la segunda base es:

$$v_c = (6.44)(0.74 \text{ mV}) = 4.77 \text{ mV}$$

La segunda etapa tiene una resistencia de colector de 2,65 k Ω , calculada en el ejemplo 10-6. De esta forma, la ganancia de tensión es:

$$A_2 = \frac{2,65 \text{ k}\Omega}{180 \Omega} = 14,7$$

La tensión de salida final es:

$$v_{out} = (14,7)(4,77 \text{ mV}) = 70 \text{ mV}$$

Otra forma de calcular la tensión de salida es usando la ganancia total de tensión:

$$A = A_1 A_2 = (6,44)(14,7) = 95$$

Entonces:

$$v_{out} = A v_{in} = (95)(0,74 \text{ mV}) = 70 \text{ mV}$$

10-5. REALIMENTACIÓN CON DOS ETAPAS

Un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar es un ejemplo de realimentación de una sola etapa. Responde razonablemente bien para estabilizar la ganancia de tensión, incrementar la impedancia de entrada y reducir la distorsión. Una realimentación con dos etapas funciona incluso mejor.

□ Idea básica

La Figura 10-10 muestra un amplificador de dos etapas con realimentación. La primera etapa tiene una resistencia de emisor sin desacoplar r_e . La segunda etapa es un amplificador en EC, con el emisor a tierra para producir la máxima ganancia en esta etapa. La señal de salida está acoplada a través de una resistencia r_f al emisor de la primera. Debido al divisor de tensión, la tensión de alterna entre el primer emisor y tierra es:

$$v_e = \frac{r_e}{r_f + r_e} v_{out}$$

Aquí está la idea básica de cómo funciona la realimentación con dos etapas: supongamos que un incremento de temperatura produce un incremento en la tensión de salida. Como parte de la tensión de salida realimenta el primer emisor, v_e aumenta. Esto hace disminuir v_{be} y v_c en la primera etapa

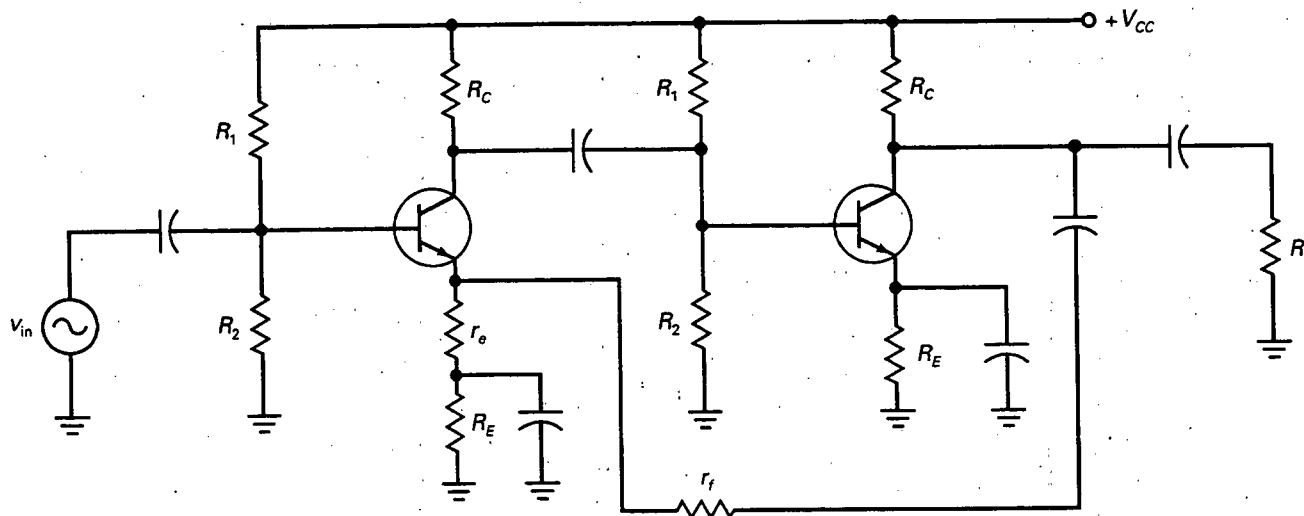


Figura 10-10. Amplificador de dos etapas con realimentación

y disminuir v_{out} . Por otra parte, si la tensión de salida intenta disminuir, v_{be} y v_{out} aumentan.

En otro caso, cualquier intento de cambio en la tensión de salida es realimentado y el amplificador cambia oponiéndose al cambio inicial. El efecto global es que la tensión de salida cambiará una cantidad mucho menor que si no existiera la realimentación.

□ Ganancia de tensión

En un amplificador con realimentación de dos etapas bien diseñado, la ganancia de tensión viene dada por la ecuación:

$$A = \frac{r_f}{r_e} + 1 \quad (10-10)$$

En la mayoría de los diseños, el primer término de esta ecuación es mucho mayor que 1, con lo que la ecuación se simplifica a:

$$A = \frac{r_f}{r_e}$$

Cuando discutamos los amplificadores operacionales, analizaremos con más detalle la realimentación negativa. En ese momento, veremos qué entendemos por un *amplificador con realimentación bien diseñado*.

La importancia de la ecuación (10-10) es el hecho de que la ganancia de tensión depende sólo de resistencias externas, r_f y r_e . Como las resistencias tienen un valor fijo, la ganancia de tensión es fija.

EJEMPLO 10-9

Usamos una resistencia variable en la Figura 10-11. Puede variar de 0 a 10 k Ω . ¿Cuál es la ganancia de tensión mínima del amplificador de dos etapas? ¿Y la máxima?

SOLUCIÓN

La resistencia de realimentación r_f es la suma de 1 k Ω y la resistencia variable. La ganancia de tensión mínima se da cuando la resistencia variable vale cero:

$$A = \frac{r_f}{r_i} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{100 \Omega} = 10$$

La ganancia de tensión máxima cuando la resistencia es de 10 k Ω :

$$A = \frac{r_f}{r_i} = \frac{11 \text{ k}\Omega}{100 \Omega} = 110$$

10-6. DETECCIÓN DE AVERÍAS

Cuando un amplificador no esté funcionando bien, el detector de averías podrá comenzar midiendo las tensiones continuas. Estas tensiones se calculan mentalmente, como se vio antes, y luego se miden para saber si son aproximadamente correctas. Si las tensiones continuas son claramente distintas de las tensiones estimadas, las averías posibles pueden ser resistencias

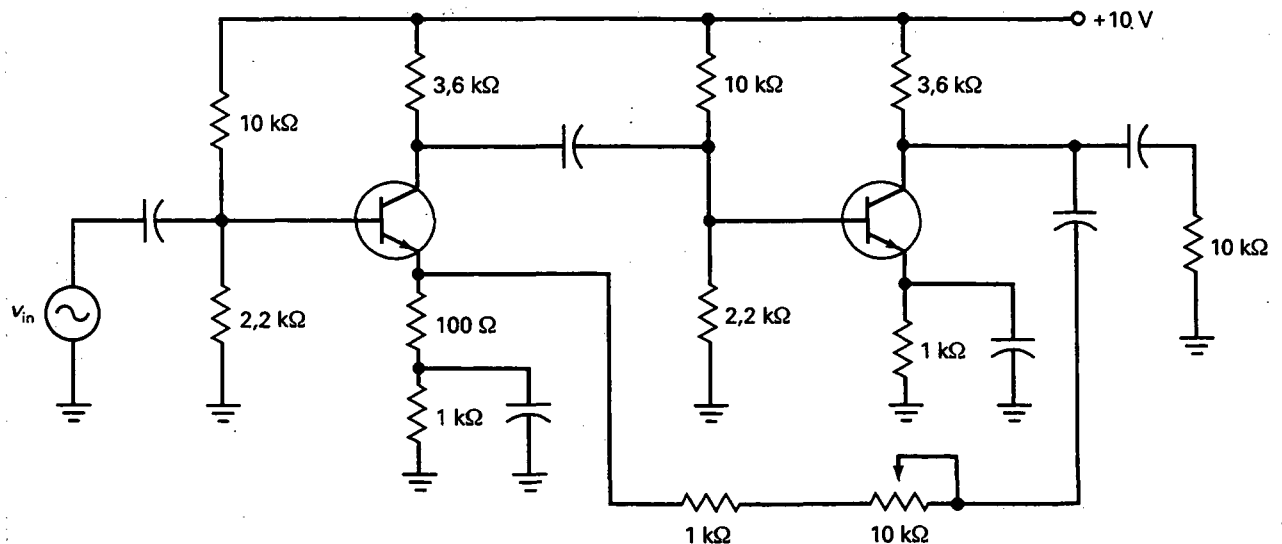


Figura 10-11. Ejemplo de amplificador de dos etapas con realimentación.

en circuito abierto (quemadas), resistencias en cortocircuito (puentes de soldadura entre ellas), conexiones incorrectas y condensadores en cortocircuito. Un cortocircuito en un condensador de desacoplo o en uno de acoplamiento cambiará el circuito equivalente para continua, lo cual implica tensiones continuas radicalmente diferentes.

Si todos los valores de las tensiones continuas son correctos, a continuación se investiga qué es lo que podría estar mal en el circuito equivalente para señal. Si hay tensión del generador, pero no hay tensión en la base, algún elemento podría estar en circuito abierto entre el generador y la base. Quizá algún cable no esté en su lugar o quizá el condensador de acoplo a la entrada está en circuito abierto. De manera análoga, si no hay tensión de salida, pero hay tensión alterna en el colector, el condensador de acoplo de salida podría estar en circuito abierto o podría faltar alguna conexión.

Es normal que no haya tensión alterna entre el emisor y masa, ya que el emisor es una masa para señal. Si un amplificador no está funcionando correctamente, uno de los elementos que un detector de averías revisa con el osciloscopio es la tensión en el emisor. Si aparece alguna tensión alterna en el emisor, es síntoma de que el condensador de desacoplo no está funcionando como debería.

Por ejemplo, un condensador de desacoplo en circuito abierto implica que el emisor deja de ser una masa para señal. Por esto, la corriente alterna del emisor fluirá a través de R_E en vez de hacerlo a través del condensador de desacoplo. Ello producirá una tensión alterna en el emisor que es detectable con un osciloscopio. Por tanto, si se ve una tensión alterna en el emisor de magnitud semejante a la tensión alterna de la base, hay que revisar el condensador de desacoplo del emisor. Podría estar defectuoso o simplemente estar mal conectado.

En condiciones normales, la línea de alimentación es un punto de masa para señal debido al condensador de filtrado que hay en la fuente de alimentación. Si el condensador de filtrado está defectuoso, el rizado se hace muy grande. Este rizado no deseado luego se simplifica igual que la señal del generador. El rizado amplificado producirá un zumbido de 60 o 120 Hz cuando el amplificador se conecte a un altavoz. Por tanto, si alguna vez se escucha un zumbido excesivo proveniente de un altavoz, uno de los primeros sospechosos del fallo debe ser un condensador de filtrado en circuito abierto en la fuente de alimentación.

EJEMPLO 10-10

El amplificador en EC de la Figura 10-12 tiene una tensión alterna nula en la carga. Si la tensión continua en el colector es 6 V y la tensión alterna en el colector es de 70 mV, ¿cuál es el fallo?

SOLUCIÓN

Como las tensiones continua y alterna en el colector son normales, hay solo dos componentes que pueden ser la causa: C_c o R_c . Si se formulan cuatro hipótesis con respecto a estos componentes, se podrá resolver el problema. Las cuatro preguntas son:

¿Y si C_c estuviera en cortocircuito?

- ¿Y si C_2 estuviera en circuito abierto?
- ¿Y si R_1 estuviera en cortocircuito?
- ¿Y si R_1 estuviera en circuito abierto?

Si C_2 estuviera en cortocircuito, entonces disminuiría significativamente la tensión continua en el colector.

Si C_2 se encontrara en circuito abierto, entonces se interrumpiría la trayectoria para señal, pero no cambiarían las tensiones continua o alterna en el colector.

Si R_1 estuviera en cortocircuito, se anularía la tensión alterna en el colector.

Si R_1 estuviera en circuito abierto, entonces aumentaría significativamente la tensión alterna en el colector.

El problema sería obvio: C_2 estaría en circuito abierto. Cuando se está aprendiendo a localizar averías es necesario plantear hipótesis individualmente para aislar el problema. Al ganar experiencia, todo el proceso se vuelve automático. Un detector de averías experimentado habría detectado este fallo casi instantáneamente.

EJEMPLO 10-11

El amplificador en EC de la Figura 10-12 tiene una tensión alterna en el emisor de 0,75 mV y una tensión alterna en el colector de 2 mV. ¿Cuál es el fallo?

SOLUCIÓN

Como la localización de averías es un arte, es necesario formular hipótesis que tengan sentido para el que las formula y a cualquier nivel que ayude a detectar el problema. Si aún no ha localizado este fallo, comience a formularse cuestiones hipotéticas acerca de cada uno de los componentes y vea si puede localizar el fallo. Luego lea el párrafo siguiente.

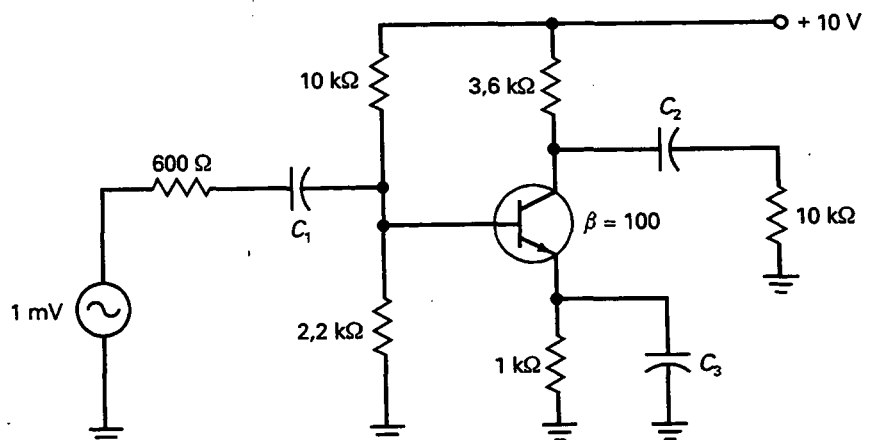


Figura 10-12. Ejemplo de detección de averías.

Sin importar que componente haya elegido, sus hipótesis no reproducirán los síntomas indicados en el enunciado del problema, excepto con estas preguntas:

¿Y si C_3 estuviera en cortocircuito?

¿Y si C_3 se encontrara en circuito abierto?

Si C_3 está en cortocircuito no se producen los síntomas enunciados, pero si los habrá si está en circuito abierto. ¿Por qué? Porque si C_3 está en circuito abierto, la impedancia de entrada de la base se hará mucho mayor y la tensión alterna de la base aumentará de 0,625 mV a 0,75 mV. Como el emisor ya no es una masa para señal, casi todos los 0,75 mV aparecen en el emisor. Como el amplificador tiene una ganancia de tensión atenuada de 2,65, la tensión alterna en el colector es aproximadamente igual a 2 mV.

RESUMEN

Sección 10-1. Ganancia de tensión

La ganancia de tensión de un amplificador en EC es igual a la resistencia para señal de colector dividida entre la resistencia para señal del diodo emisor.

Sección 10-2. El efecto de carga de la impedancia de entrada

La impedancia de entrada de la etapa está formada por las resistencias de polarización y la impedancia de entrada a la base. Cuando la fuente de señal no es constante comparada con esta impedancia de entrada, la tensión de entrada es menor que la tensión de la fuente.

Sección 10-3. Amplificadores multietapa

La ganancia global de tensión es igual al producto de las ganancias individuales. La impedancia de entrada de la segunda etapa es la resistencia de carga de la primera etapa. Dos etapas en EC producen una señal amplificada en fase.

Sección 10-4. Amplificador EC con resistencia de emisor sin desacoplar

Acoplando las resistencias de emisor conseguimos realimentación negativa. Esto estabiliza la ganancia de tensión, aumenta la impedancia de entrada y disminuye la distorsión para señales grandes.

Sección 10-5. Realimentación con dos etapas

Podemos reenviar la tensión de salida del segundo colector al primer emisor a través de un divisor de ten-

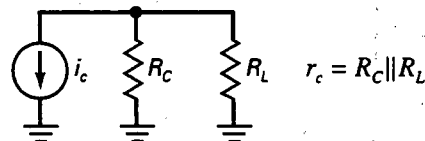
sión. Esto produce realimentación negativa, la cual estabiliza la ganancia de tensión del amplificador de dos etapas.

Sección 10-6. Detección de averías

Empiece con las medidas de corriente continua. Si no consigue aislar el problema, continúe con las medidas de corriente alterna hasta encontrar el problema.

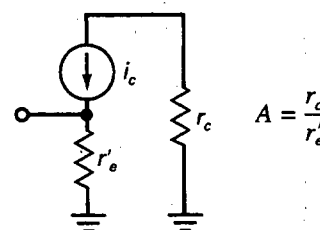
DEFINICIONES

(10-2) Resistencia de colector para corriente alterna:



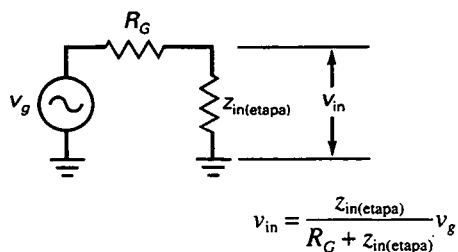
DERIVACIONES

(10-3) Ganancia de tensión en EC:

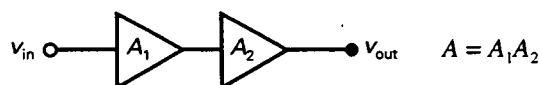


358 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

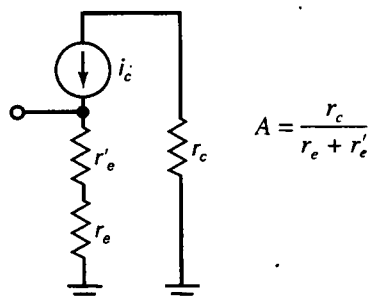
(10-4) Efecto de la carga:



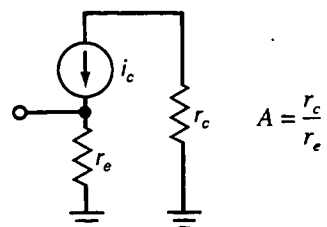
(10-5) Ganancia de tensión para dos etapas:



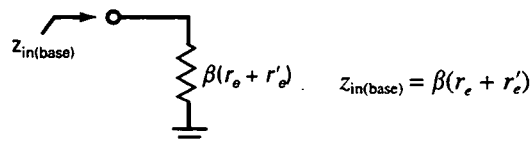
(10-6) Realimentación de una etapa:



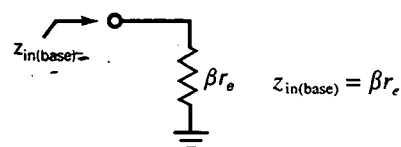
(10-7) Amplificador EC con resistencia de emisor sin desacoplar:



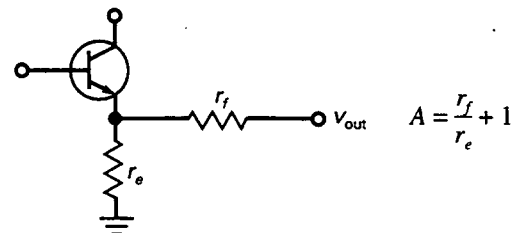
(10-8) Impedancia de entrada de un amplificador EC con resistencia de emisor sin desacoplar:



(10-9) Impedancia de entrada para dos etapas con realimentación:



(10-10) Ganancia de realimentación para dos etapas:



EJERCICIOS PARA EL ALUMNO

CUESTIONES

- El emisor es una masa para señal en una etapa en
 - BC
 - CC
 - EC
 - Ninguna de las anteriores
- La señal de salida de una etapa en EC normalmente
 - Es constante
 - Depende de r'_e
 - Es pequeña
 - Es menor que uno
- La ganancia de tensión es igual a la tensión de salida dividida entre
 - La tensión de entrada
 - La resistencia para señal de emisor
 - La resistencia para señal de colector
 - La tensión del generador
- La impedancia de entrada de la base aumenta si
 - β aumenta

- b) La tensión de la fuente de alimentación aumenta
- c) Disminuye
- d) La resistencia del colector para señal aumenta
- 5. La ganancia de tensión es directamente proporcional a
 - a) β
 - b) r'_e
 - c) La tensión continua del colector
 - d) La resistencia para señal del colector
- 6. En comparación con la resistencia para señal del diodo emisor, la resistencia de realimentación de un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar debe ser
 - a) Pequeña
 - b) Igual
 - c) Grande
 - d) Cero
- 7. En comparación con una etapa en EC, un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar tiene una impedancia de entrada que es
 - a) Menor
 - b) Igual
 - c) Mayor
 - d) Cero
- 8. Para redimir la distorsión de una señal amplificada, se puede aumentar
 - a) La resistencia del colector
 - b) La resistencia de realimentación del emisor
 - c) La resistencia del generador
 - d) La resistencia de carga
- 9. El emisor de un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar
 - a) Está puesto a masa
 - b) No tiene tensión continua
 - c) Tiene una tensión alterna
 - d) No tiene tensión alterna
- 10. En un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar se utiliza
 - a) Polarización de base
 - b) Realimentación positiva
 - c) Realimentación negativa
 - d) Un emisor puesto a masa
- 11. En un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar, los efectos del diodo emisor llegan a ser
 - a) Importantes para la ganancia de tensión
 - b) Críticos para la impedancia de entrada
 - c) Significativos para el análisis
 - d) De importancia nula
- 12. La resistencia de realimentación
 - a) Aumenta la ganancia de tensión
 - b) Reduce la distorsión
 - c) Disminuye la resistencia de colector
 - d) Disminuye la impedancia de entrada
- 13. La resistencia de realimentación
 - a) Estabiliza la ganancia de tensión
 - b) Aumenta la distorsión
 - c) Aumenta la resistencia de colector
 - d) Disminuye la impedancia de entrada

- 14. La resistencia para señal de colector de la primera etapa incluye la
 - a) Resistencia de carga
 - b) Impedancia de entrada de la primera etapa
 - c) Resistencia de emisor de la primera etapa
 - d) Impedancia de entrada de la segunda etapa
- 15. Si el condensador de desacoplo del emisor está en circuito abierto, la señal de salida alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 16. Si la resistencia de colector se pone en cortocircuito, la tensión de salida alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 17. Si la resistencia de carga está en circuito abierto, entonces la tensión de salida alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 18. Si alguno de los condensadores está en circuito abierto, la señal de salida alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 19. Si el condensador de acoplo de la entrada está en circuito abierto, entonces la tensión de entrada alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 20. Si el condensador de desacoplo está en circuito abierto, la señal de entrada alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 21. Si el condensador de acoplo de la salida está en circuito abierto, la tensión de entrada alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 22. Si la resistencia de emisor está en circuito abierto, la tensión de entrada alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 23. Si la resistencia de colector está en circuito abierto, la tensión de entrada alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero
- 24. Si el condensador de desacoplo del emisor está en cortocircuito, la tensión de entrada alterna
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es igual a cero

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

- 1. Dibuje un amplificador PDT. Ahora, describa cómo funciona. Incluya la ganancia de tensión y la impedancia de entrada en su discusión.

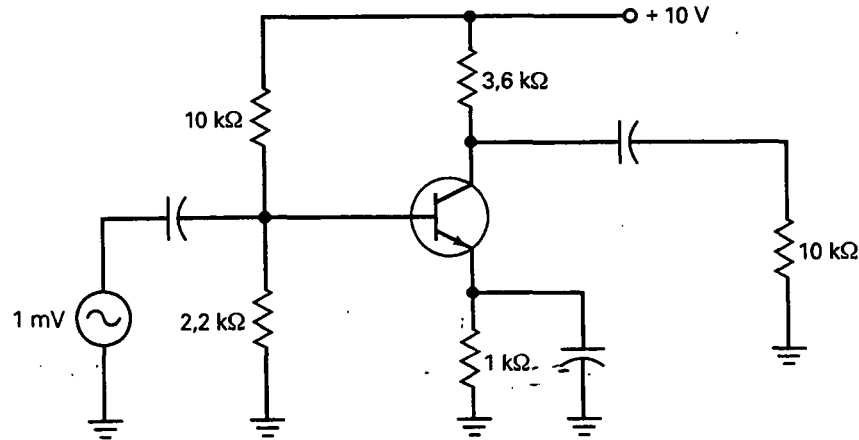


Figura 10-13

2. Dibuje un amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar. ¿Cuánto vale la ganancia de tensión y la impedancia de entrada? ¿Por qué estabiliza la ganancia de tensión?
3. En un amplificador multietapa, ¿qué efecto tiene la impedancia de entrada de una etapa sobre la anterior? ¿Qué efecto tiene un cambio en el valor de β ?
4. ¿Cuáles son las tres mejoras que introduce la realimentación negativa en un amplificador?
5. Queremos que un circuito como el de la Figura 10-12 trabaje por debajo de 0 Hz. ¿Qué cambios debemos hacer?
6. ¿Qué efecto produce una resistencia de emisor sin desacoplar en la ganancia de tensión?
7. ¿Qué características son deseables en un amplificador de audio y por qué?
8. ¿Qué es una resistencia de emisor sin desacoplar y qué produce?
9. Si no tenemos ningún valor para β , ¿cuál puede ser razonable para suponer por un técnico?
10. Explique la utilidad de los condensadores en los amplificadores de tensión multietapa.
11. ¿Qué es una resistencia de emisor sin desacoplar? Enumere tres mejoras que produce.

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 10-1. Ganancia de tensión

- 10-1. La tensión del generador en el circuito de la Figura 10-13 se duplica. En esas condiciones, ¿cuánto vale la tensión de salida?

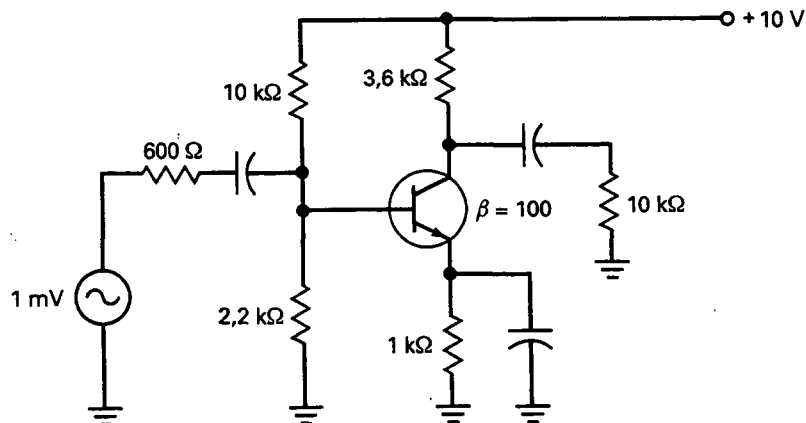


Figura 10-14

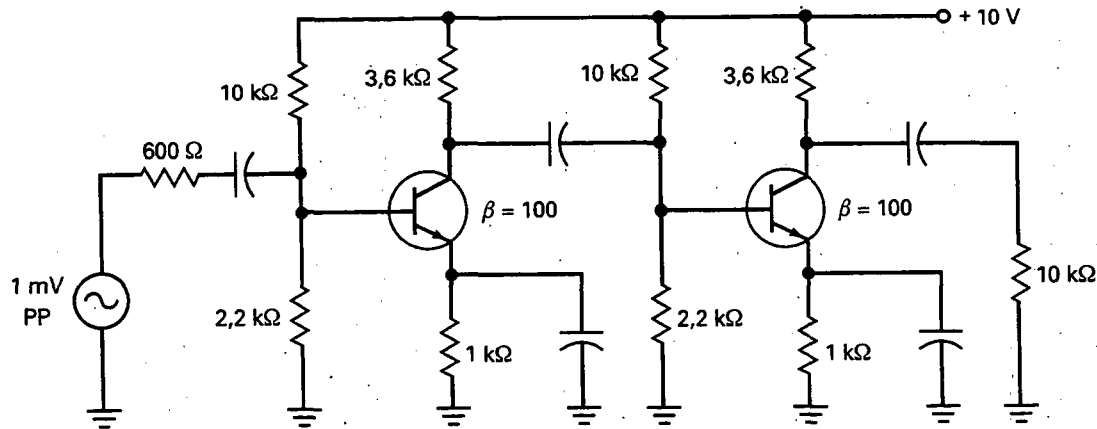


Figura 10-15

- 10-2. La resistencia de carga en el circuito de la Figura 10-13 se duplica. ¿Cuánto vale la ganancia de tensión?
- 10-3. En la Figura 10-13 la fuente de alimentación aumenta a +20 V. ¿Cuál es la tensión de salida?

Sección 10-2. El efecto de carga de la impedancia de entrada

- 10-4. La tensión de la fuente de alimentación en el circuito de la Figura 10-14 se duplica. ¿Cuánto vale la tensión alterna de salida?
- 10-5. Si la resistencia del generador en el circuito de la Figura 10-14 se duplica, ¿cuánto vale la tensión alterna de salida?

- 10-6. Si la resistencia del generador en el circuito de la Figura 10-14 se duplica, ¿cuánto vale la tensión alterna de salida?

Sección 10-3. Amplificadores multietapa

- 10-7. En la Figura 10-15, ¿cuánto vale la tensión alterna de la primera base? ¿Y en la segunda? ¿Y la de la resistencia de carga?
- 10-8. Si la tensión de alimentación aumenta a 12 V en el circuito de la Figura 10-15, ¿cuánto vale la tensión alterna de salida?
- 10-9. Si $\beta = 300$ para los transistores en el circuito de la Figura 10-15, ¿cuánto vale la tensión alterna de salida?

Sección 10-4. Amplificador en EC con resistencia de emisor sin desacoplar

- 10-10. La tensión del generador en el circuito de la Figura 10-16 se duplica. ¿Cuánto vale la tensión alterna de salida? Ignorar r_e' .
- 10-11. Si la resistencia del generador en el circuito de la Figura 10-16 se duplica, ¿cuánto vale la tensión alterna de salida?
- 10-12. La resistencia de carga en el circuito de la Figura 10-16 se reduce a 4,7 kΩ. ¿Cuánto vale la ganancia de tensión?
- 10-13. La tensión de la fuente de alimentación en el circuito de la Figura 10-16 se triplica. ¿Cuánto vale la ganancia de tensión?

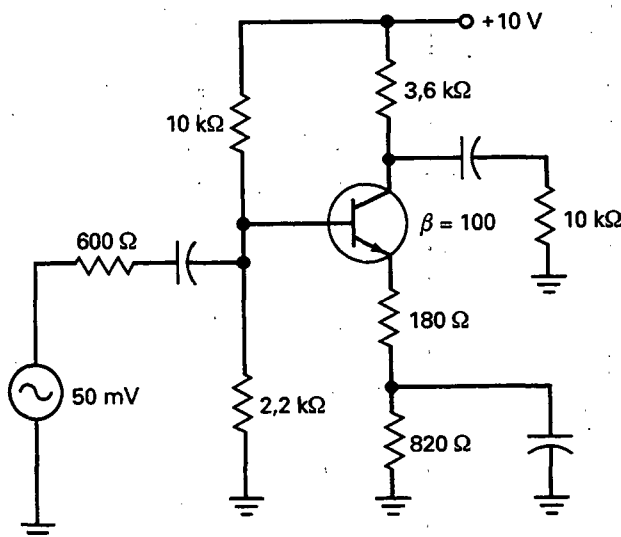


Figura 10-16

Sección 10-5. Realimentación con dos etapas

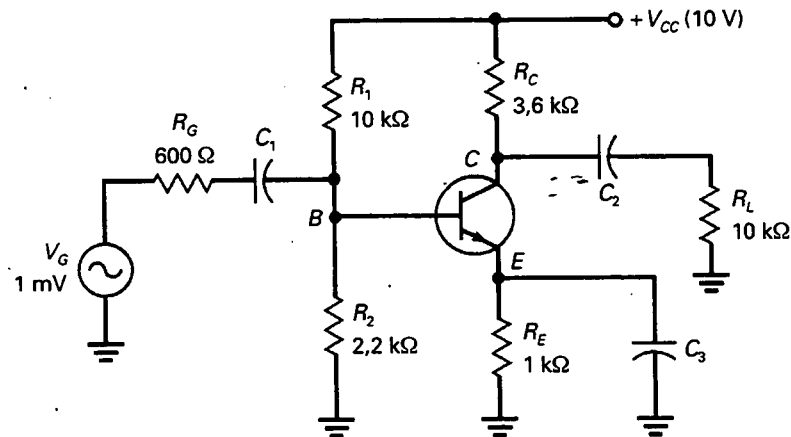
- 10-14. Un amplificador con realimentación como el de la Figura 10-10 tiene $r_f = 5 \text{ k}\Omega$ y $r_e = 75 \Omega$. ¿Cuánto vale la ganancia de tensión?

362 PRINCIPIOS DE ELECTRONICA

10-15. En un amplificador con realimentación como el de la Figura 10-11, $r_e = 125 \Omega$. Si queremos una ganancia de tensión de 70, ¿qué valor deberá de tener r_f ?

Sección 10-6. Detección de averías

10-16. En el circuito de la Figura 10-15, el condensador de desacoplo del emisor está en circuito



OK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
$V_B : B2$	$V_B : A4$	$V_B : A1$	$V_B : B5$	$V_B : E3$	$V_B : B2$	$V_B : F1$	$V_B : A4$	$V_B : B5$
$V_E : D3$	$V_E : B5$	$V_E : B4$	$V_E : D2$	$V_E : C2$	$V_E : D3$	$V_E : E4$	$V_E : D3$	$V_E : D2$
$V_C : E5$	$V_C : F2$	$V_C : B6$	$V_C : B6$	$V_C : B6$	$V_C : E5$	$V_C : B1$	$V_C : F2$	$V_C : F5$
$V_b : E1$	$V_b : A5$	$V_b : C1$	$V_b : E3$	$V_b : C3$	$V_b : E1$	$V_b : G1$	$V_b : C1$	$V_b : E3$
$V_o : G4$	$V_o : G1$	$V_o : E3$	$V_o : G1$	$V_o : A5$	$V_o : E3$	$V_o : C2$	$V_o : F4$	$V_o : A5$
$V_c : D6$	$V_c : C2$	$V_c : A5$	$V_c : A5$	$V_c : G1$	$V_c : C5$	$V_c : A5$	$V_c : A6$	$V_c : G1$
T9	T10							
$V_B : C2$	$V_B : G2$							
$V_E : E3$	$V_E : A2$							
$V_C : G1$	$V_C : C4$							
$V_b : F4$	$V_b : B3$							
$V_o : A5$	$V_o : A2$							
$V_c : G4$	$V_c : G3$							
T11	T12							
$V_B : D1$	$V_B : D5$							
$V_E : F3$	$V_E : E6$							
$V_C : G5$	$V_C : F2$							
$V_b : E2$	$V_b : C6$							
$V_o : E2$	$V_o : E2$							
$V_c : G6$	$V_c : D4$							

	1	2	3	4	5	6
A	1,83	0	1,13	1,8	0	1,93 mV
B	2,8	1,8	0,75 mV	1,13	1,1	10
C	0,75 mV	0	0,8 mV	10	98 mV	0
D	2,1	0,4	1,1	0	1,8	73 mV
E	0,6 mV	0	0	2,7	6	1,1
F	3,4	6	2,1	0,75 mV	0,5	0
G	0	1,83	0	0	2,1	0

MEDIDAS

Figura 10-17. Detector de averías.

abierto en la primera etapa. ¿Qué sucederá con las tensiones continuas de la primera etapa? ¿Qué pasará con la tensión alterna de entrada a la segunda etapa? ¿Qué sucederá con la tensión de salida final?

- 10-17.** En el circuito de la Figura 10-15 no hay tensión alterna en la carga. La tensión alterna de entrada a la segunda etapa es aproximadamente de 20 mV. Enumere algunos de los fallos posibles.

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 10-18.** Todas las resistencias se duplican en el circuito de la Figura 10-13. ¿Cuánto vale la ganancia de tensión?

- 10-19.** Si todas las resistencias se duplican en el circuito de la Figura 10-14, ¿qué valor toma la tensión de salida?
- 10-20.** Si todas las resistencias se duplican en el circuito de la Figura 10-15, ¿cuánto vale la tensión de salida?
- 10-21.** Si la resistencia de carga de la Figura 10-15 está desconectada, ¿cuánto vale la resistencia Thevenin de la segunda etapa?

DETECTOR DE AVERÍAS

Utilice la Figura 10-17 para los problemas siguientes.

- 10-22.** Encuentre los fallos del 1 al 4.
- 10-23.** Encuentre los fallos del 5 al 8.
- 10-24.** Encuentre los fallos del 9 al 12.

Amplificadores de potencia

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Conocer cómo se determinan la recta de carga para continua, la recta de carga para alterna y el punto Q para un circuito con configuración en emisor común.
- Calcular el valor máximo pico a pico de la tensión alterna no recortada (MPP) que es posible obtener con un amplificador en emisor común determinado.
- Describir las características de un amplificador, incluyendo clases de operación, tipos de acoplamiento y rangos de frecuencia.
- Conocer los factores que limitan la disipación máxima de potencia del transistor y las medidas que se pueden adoptar para mejorar dicha limitación.

VOCABULARIO

- | | | |
|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
| • acoplamiento directo | • amplificador de radio-frecuencia (RF) | • funcionamiento en clase C |
| • acoplamiento por condensador | • amplificador de radio-frecuencia sintonizado | • funcionamiento para señales grandes |
| • amplificador de audio | • ancho de banda | • ganancia de potencia |
| • amplificador de banda ancha | • armónicos | • pico máximo de tensión (MP) |
| • amplificador de banda estrecha | • ciclo de trabajo | • preamplificador |
| • amplificador de corriente continua | • circuitos en contra fase | • rendimiento |
| • amplificador de potencia | • consumo de corriente | • tensión máxima pico a pico (MPP) |
| | • funcionamiento en clase A | • transformador acoplado |
| | • funcionamiento en clase B | |

En un equipo de alta fidelidad, una radio o una televisión, la señal de entrada es pequeña. Después de varias etapas de ganancia de tensión, no obstante, la señal se hace grande y utiliza la recta de carga en su totalidad. En estas últimas etapas, las corrientes de colector son mucho mayores porque las impedancias de carga son mucho menores. En unos altavoces estéreo, por ejemplo, la impedancia de la carga final es de sólo 8Ω .

Como se mencionó en el Capítulo 6, los transistores para pequeña señal tienen una limitación de potencia menor de 1 W, mientras que los transistores de potencia tienen una limitación de potencia superior a 1 W. Los transistores para pequeña señal se utilizan, por lo general, en las primeras etapas de los sistemas, donde la potencia de la señal es pequeña, y los transistores de potencia se emplean en la última etapa de los sistemas porque la potencia y corriente de la señal son grandes.

11-1. CLASIFICACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES

Hay diferentes maneras de clasificar los amplificadores. Por ejemplo, podemos clasificarlos por su clase de funcionamiento, por su acoplamiento entre etapas o por su rango de frecuencias.

□ Clases de funcionamiento

Por funcionamiento en clase A se entiende que el transistor trabaja siempre en su zona activa. Esto equivale a decir que por el colector circula corriente durante los 360° del ciclo de señal, como se muestra en la Figura 11-1a. Con un amplificador de clase A, el diseñador trata de situar el punto Q en algún lugar cerca de la mitad de la recta de carga. De esta forma, la señal puede oscilar sobre el máximo rango posible sin saturar o cortar el transistor, lo que distorsionaría la señal.

El funcionamiento en clase B es diferente. En este caso, la corriente de colector circula solamente medio ciclo (180°), como se muestra en la Figura 11-1b. Para obtener este tipo de funcionamiento, el diseñador sitúa el punto Q en el corte. Entonces, sólo la mitad positiva de la tensión de alterna en la base puede producir corriente en el colector. Esto reduce la disipación de calor en los transistores de potencia.

Por funcionamiento en clase C se entiende cuando circula corriente por el colector durante menos de 180° del ciclo, como se muestra en la Figura 11-1c. Con el funcionamiento en clase C, sólo parte del semiciclo positivo de tensión alterna en la base produce corriente en el colector. Como resultado, obtenemos pulsos cortos de corriente de colector como los de la Figura 11-1c.

□ Tipos de acoplamiento

La Figura 11-2a muestra un *acoplamiento por condensador*. El condensador de acoplo transmite la tensión de señal amplificada a la siguiente etapa. La Figura 11-2b ilustra un *acoplamiento por transformador*. Aquí la tensión de

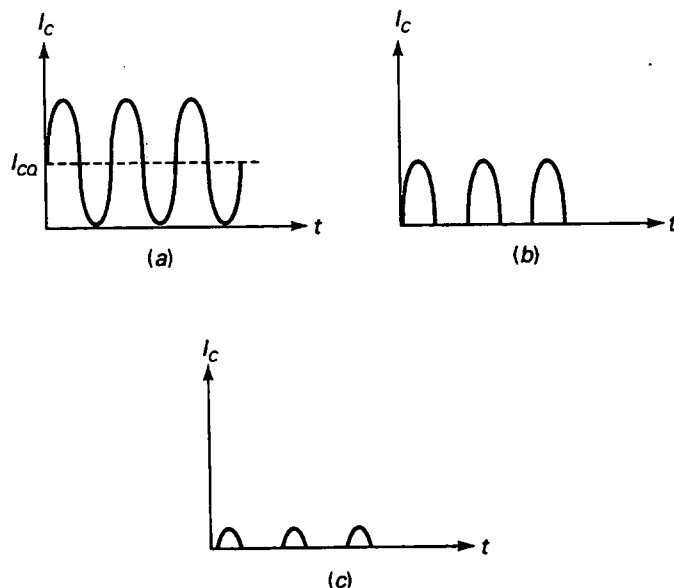


Figura 11-1. Corriente de colector. a) Clase A; b) clase B; c) clase C.

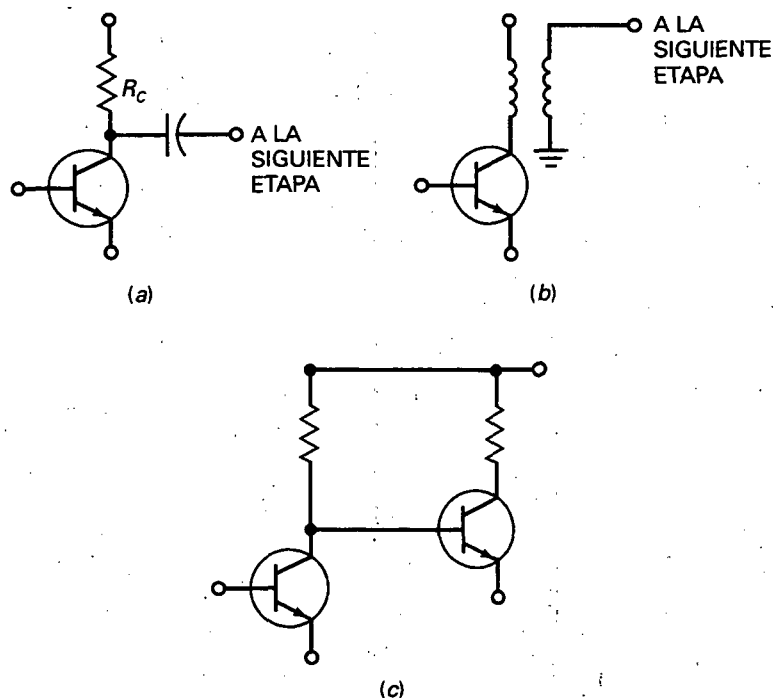


Figura 11-2. Tipos de acoplamiento. a) Por condensador; b) por transformador; c) directo.

señal está acoplada a través de un transformador con la siguiente etapa. El acoplamiento por condensador y el acoplamiento por transformador son ambos ejemplos de acoplamiento de corriente alterna con bloques de tensión de corriente continua.

El *acoplamiento directo* es distinto. En la Figura 11-2c existe una conexión directa entre el colector del primer transistor y la base del segundo transistor. Por esto, las tensiones alterna y continua están acopladas. Como no hay una frecuencia mínima límite, un amplificador con acoplamiento directo se llama *amplificador de corriente continua*.

❑ Rangos de frecuencia

Otra forma de clasificar los amplificadores es atendiendo a su rango de frecuencias. Por ejemplo, un *amplificador de audio* define un amplificador que funciona entre los 20 Hz y los 20 kHz. Por otra parte, un *amplificador de radio frecuencia (RF)* es el que funciona por encima de los 20 kHz, normalmente muy por encima. Por ejemplo, el amplificador de RF en los aparatos de radio AM amplifica frecuencias entre los 535 y 1.605 kHz, y el amplificador de RF en los aparatos de radio FM amplifica frecuencias entre los 88 y 108 MHz.

Los amplificadores se clasifican también en *banda estrecha* o *banda ancha*. Los de banda estrecha trabajan sobre pequeños rangos de frecuencia,

como de 450 a 460 kHz. Los de banda ancha lo hacen en grandes rangos de frecuencia, como de 0 a 1 MHz.

Los amplificadores de banda estrecha son amplificadores de RF sintonizados, lo que quiere decir que su carga en alterna es un circuito resonante con un valor de Q alto sintonizado con una emisora de radio o televisión. Los amplificadores de banda ancha están normalmente desintonizados; esto es, su carga de corriente alterna es resistiva.

La Figura 11-3a es un ejemplo de amplificador de RF sintonizado. El circuito LC es resonante para algunas frecuencias. Si el circuito resonante tiene un valor de Q alto, el ancho de banda es estrecho. La salida está acoplada por condensador con la siguiente etapa.

La Figura 11-3b es otro ejemplo de amplificador RF sintonizado. Esta vez, la señal de salida de banda estrecha está acoplada por transformador con la siguiente etapa.

□ Nivel de señal

Vamos a describir el funcionamiento para *señales pequeñas*, en el cual la oscilación pico a pico de corriente en el colector es menor de un 10 por 100 de la corriente de colector sin corriente alterna. En funcionamiento para *señales grandes*, la señal pico a pico emplea toda o la mayoría de la recta de carga. En un equipo de alta fidelidad, la pequeña señal de un sintonizador de radio, reproductor de cintas o reproductor de discos compactos se usa como entrada a un *preamplificador*, un amplificador que produce una señal grande de salida adecuada para ajustar el volumen o el tono. La señal se emplea, entonces, como entrada de un *amplificador de potencia*, el cual transforma la salida de unos cientos de milivatios a cientos de vatios.

En el resto de este capítulo trataremos los amplificadores de potencia y describiremos sus características, como recta de carga, ganancia de potencia y rendimiento.

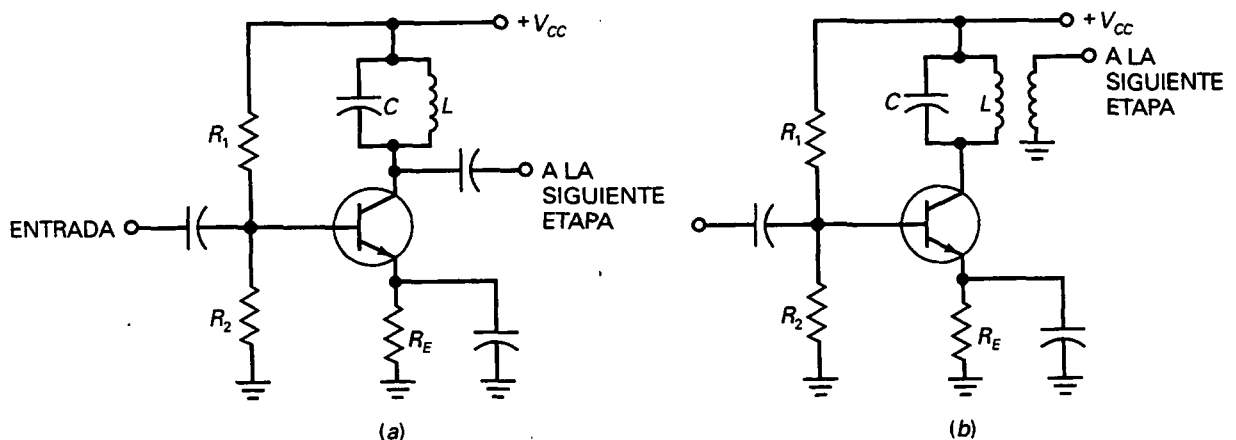


Figura 11-3. Amplificadores RF sintonizados. a) Acoplamiento por condensador; b) acoplamiento por transformador.

11-2. DOS RECTAS DE CARGA

Cada amplificador tiene un circuito equivalente para corriente continua y otra para corriente alterna. Por ello, tiene dos rectas de carga: la recta de carga para continua y la recta de carga para alterna. Para el funcionamiento con pequeñas señales, la posición del punto Q no es crítica. Pero con amplificadores de señal grande, el punto Q tiene que estar en la mitad de la recta de carga de alterna para conseguir la máxima oscilación en la salida.

□ Recta de carga para corriente continua

La Figura 11-4a es un amplificador con divisor de tensión en la base (PDT). Una forma de mover el punto Q es variando el valor de R_2 . Para valores grandes de R_2 , el transistor entra en saturación y su corriente viene dada por:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (11-1)$$

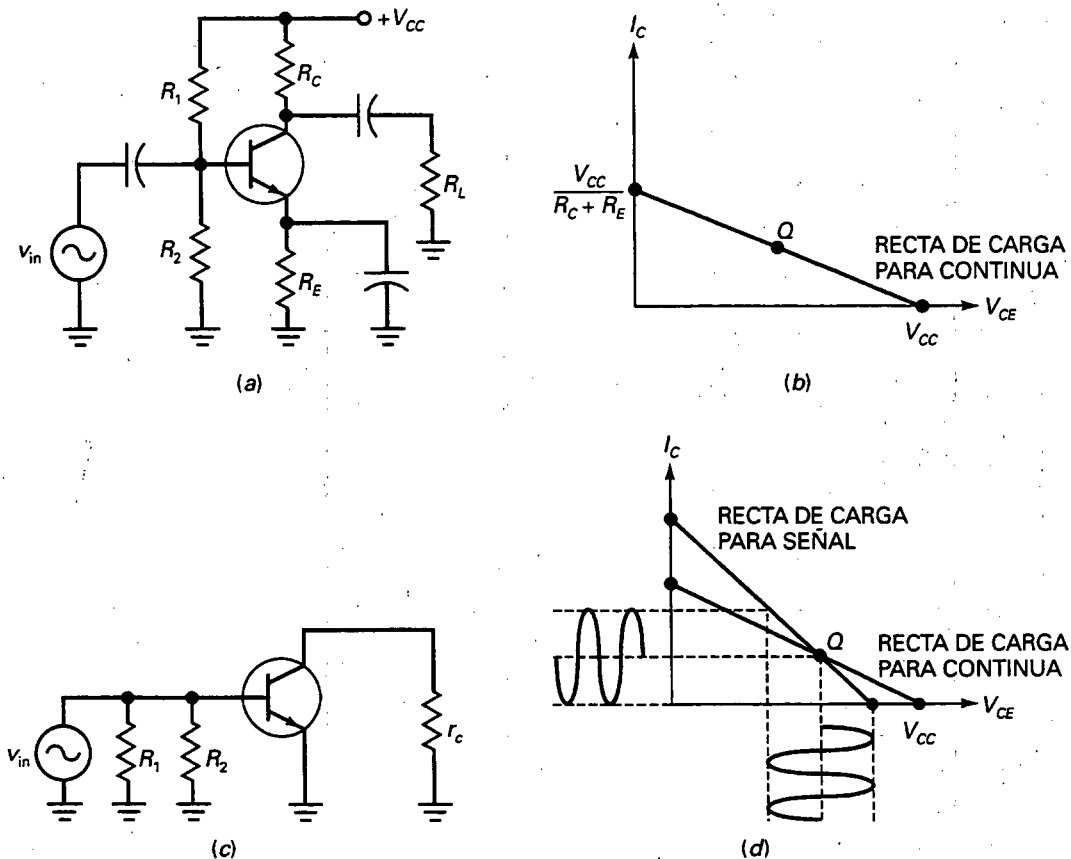


Figura 11-4. a) Amplificador PDT; b) recta de carga para corriente continua; c) circuito equivalente para corriente alterna; d) recta de carga para corriente alterna.

Valores muy pequeños de R_2 llevarán al transistor a la zona de corte, y su tensión será:

$$V_{CE(\text{corte})} = V_{CC} \quad (11-2)$$

La Figura 11-4b muestra la recta de carga con el punto Q .

□ Recta de carga para corriente alterna

La Figura 11-4c es el circuito equivalente para el amplificador PDT en corriente alterna. Con el emisor a tierra, R_E no afecta al funcionamiento. Además, la resistencia de colector para corriente alterna es menor que la resistencia de colector para corriente continua. Por tanto, cuando llega una señal de alterna, el punto de operación instantáneo se mueve a lo largo de la recta de carga para corriente alterna de la Figura 11-4d. En otras palabras, la corriente sinusoidal pico a pico y la tensión vienen determinadas por la recta de carga para señal.

Ya que la recta de carga para señal tiene una pendiente mayor que la de continua, el máximo pico a pico (MPP) de la salida es siempre menor que la tensión de alimentación. Como ecuación:

$$\text{MPP} < V_{CC} \quad (11-3)$$

Por ejemplo, si la tensión de alimentación es de 10 V, la salida sinusoidal máxima pico a pico es menor de 10 V.

□ Recorte de señales grandes

Cuando el punto Q está en el centro de la recta de carga para continua (Fig. 11-4d), la señal de alterna no puede usar toda su recta de carga sin recortarse. Por ejemplo, si la señal de alterna se incrementa, obtendremos el recorte por corte en el transistor mostrado en la Figura 11-5a.

Si el punto Q se mueve hacia zonas altas, como muestra la Figura 11-5b, una señal grande llevará el transistor a saturación. Tanto el recorte por corte como por saturación son no deseables, ya que distorsionan la señal. Cuando una señal como ésta llega a un altavoz, el sonido es terrible.

Un amplificador para señales grandes bien diseñado tiene el punto Q en el medio de la recta de carga para señal (Fig. 11-5c). En este caso, conseguimos la salida sin recortar máxima pico a pico.

□ Salida máxima

Cuando el punto Q está por debajo del centro de la recta de carga para señal, el pico máximo (MP) de salida es $I_{CQ}r_c$, como muestra la Figura 11-6a. Por otra parte, si el punto Q está por encima del centro de la recta de carga para señal, el pico máximo de salida es V_{CEQ} , como muestra la Figura 11-6b.

Para cualquier punto Q , el pico máximo de salida es:

$$\text{MP} = I_{CQ}r_c \text{ o } V_{CEQ}, \text{ el que sea menor} \quad (11-4)$$

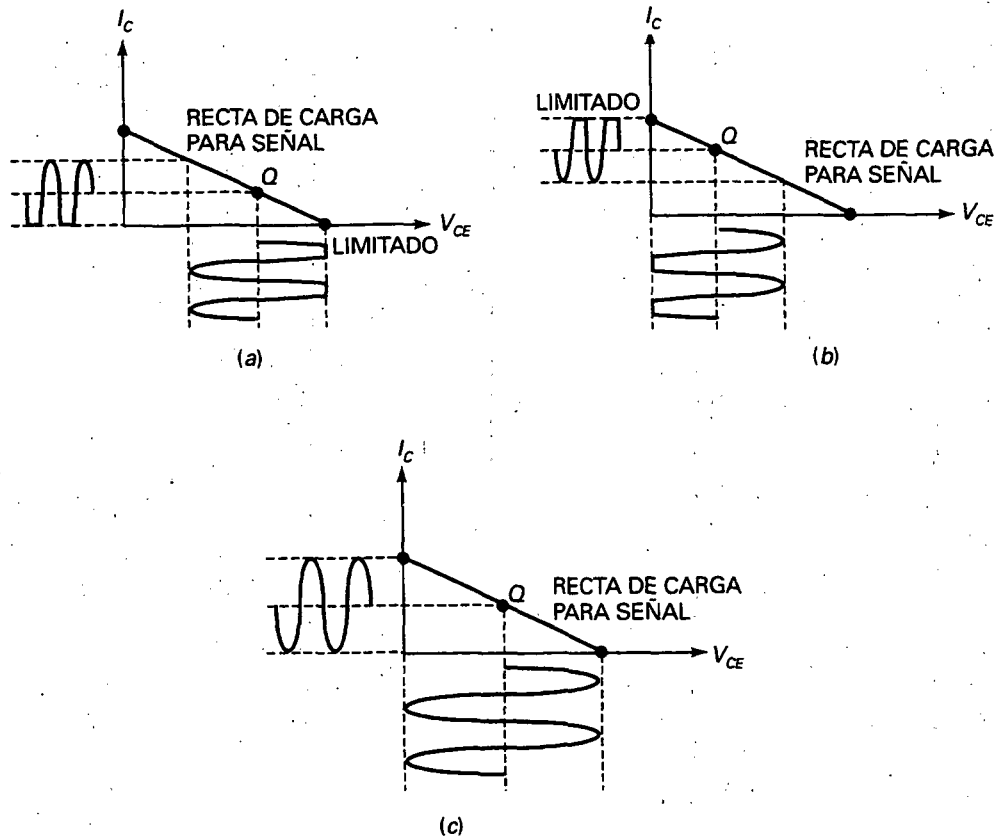


Figura 11-5. a) Recorte en zona de corte; b) recorte en zona de saturación; c) punto Q óptimo.

y el máximo pico a pico en la salida es el doble de esta cantidad:

$$MPP = 2 MP \quad (11-5)$$

Las Ecuaciones (11-4) y (11-5) son usuales en detección de averías para determinar las salidas máximas posibles sin recorte.

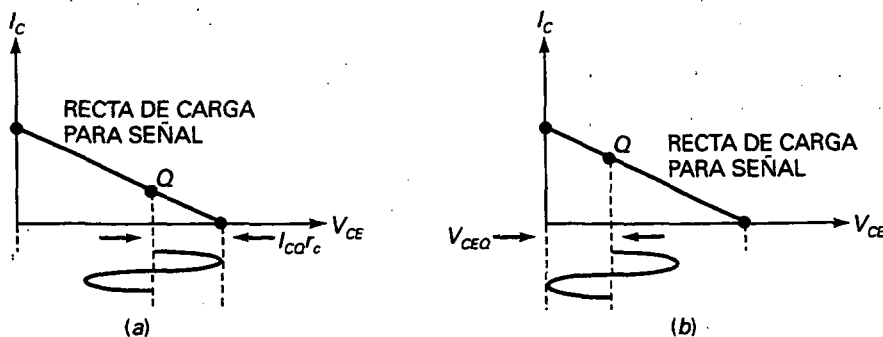


Figura 11-6. Punto Q en el centro de la recta de carga para corriente alterna.

Cuando el punto Q está en el centro de la recta de carga:

$$I_{CQ}r_c = V_{CEQ} \quad (11-6)$$

Un diseñador tratará de satisfacer esta condición lo máximo posible, considerando la tolerancia de las resistencias de polarización.

EJEMPLO 11-1

¿Cuál es el valor de I_{CQ} , V_{CEQ} y r_c en la Figura 11-7?

SOLUCIÓN

$$I_{CQ} = \frac{1.8 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1.1 \text{ mA}$$

$$V_c = 10 \text{ V} - (1.1 \text{ mA})(3.6 \text{ k}\Omega) = 6.04 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = 6.04 \text{ V} - 1.1 \text{ V} = 4.94 \text{ V}$$

y

$$r_c = 3.6 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega = 2.65 \text{ k}\Omega$$

EJEMPLO 11-2

¿Qué valor toma la tensión de salida máxima pico a pico en la Figura 11-7?

SOLUCIÓN

Con una tensión de alimentación de 10 V:

$$\text{MPP} < 10 \text{ V}$$

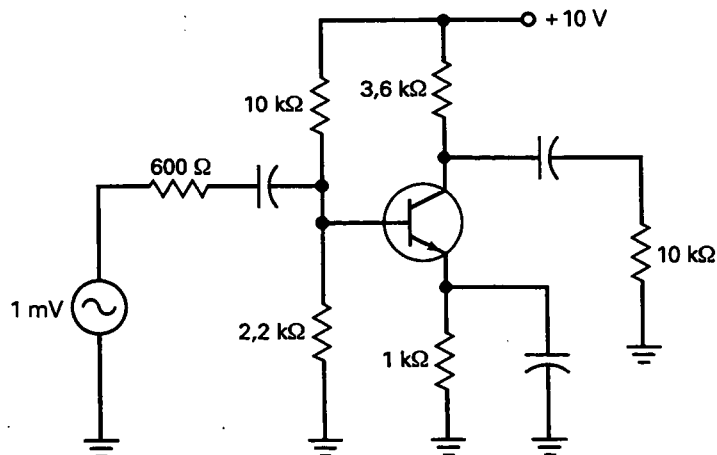


Figura 11-7. Ejemplo.

Este es el límite superior de la tensión de salida del amplificador sin distorsionar.

Ahora calculamos lo siguiente:

$$I_{CQ} R_C = (1,1 \text{ mA})(2,65 \text{ k}\Omega) = 2,92 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = 4,94 \text{ V}$$

Como el pico máximo de salida es el menor de los dos:

$$MP = 2,92 \text{ V}$$

y

$$MPP = 2(2,92 \text{ V}) = 5,84 \text{ V}$$

EJEMPLO 11-3

La Figura 11-8 muestra un amplificador PDT con una resistencia de emisor de 750Ω . ¿Cuál es la máxima tensión de salida pico a pico ahora?

SOLUCIÓN

La corriente de colector se incrementa a:

$$I_{CQ} = \frac{1,1 \text{ V}}{750 \Omega} = 1,47 \text{ mA}$$

La tensión de continua en el colector disminuye a:

$$V_C = 10 \text{ V} - (1,47 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 4,71 \text{ V}$$

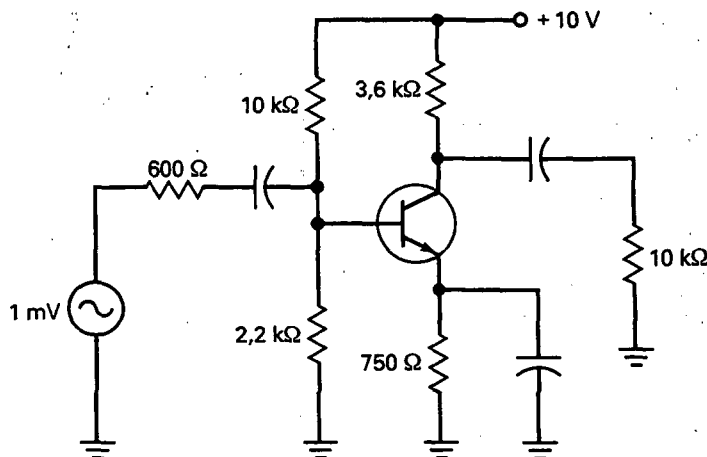


Figura 11-8. Ejemplo.



11-3. FUNCIONAMIENTO EN CLASE A

El amplificador PDT de la Figura 11-9a es un amplificador de clase A, ya que la señal de salida no está recortada. Con este tipo de amplificador, la corriente circula por el colector durante todo el ciclo. Dicho de otra forma, no aparecen recortes en la señal de salida durante todo el ciclo. Ahora discutiremos unas cuantas ecuaciones, usuales en el análisis de los amplificadores de clase A.

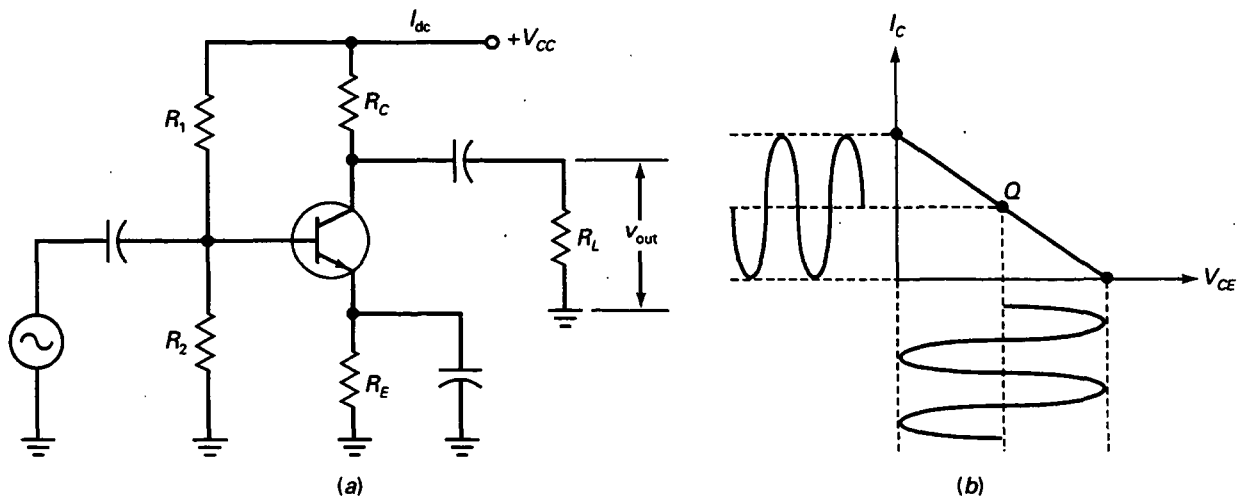


Figura 11-9. Amplificador de clase A.

□ Ganancia de potencia

Además de la ganancia de tensión, cualquier amplificador tiene una *ganancia de potencia*, definida como:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (11-7)$$

Es decir, la ganancia de potencia es igual a la potencia de salida para señal dividida entre la potencia de entrada para señal.

Por ejemplo, si el amplificador de la Figura 11-9a tiene una potencia de salida de 10 mW y una potencia de entrada de 10 μW, su ganancia de potencia será:

$$G = \frac{10 \text{ mW}}{10 \text{ μW}} = 1.000$$

□ Potencia de salida

Si medimos la tensión de salida en la Figura 11-9a con un voltímetro rms, la potencia de salida viene dada por

$$P_{out} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} \quad (11-8)$$

Normalmente, medimos la tensión de salida pico a pico con un osciloscopio. En este caso, la ecuación adecuada para calcular la ganancia de potencia es:

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{8R_L} \quad (11-9)$$

El factor 8 en el denominador viene dado, ya que $V_{pp} = 2\sqrt{2} V_{rms}$. Si elevamos al cuadrado $2\sqrt{2}$, obtenemos 8.

La máxima potencia de salida se produce cuando el amplificador está generando la salida máxima pico a pico, como muestra la Figura 11-9b. En este caso, V_{pp} iguala la salida máxima pico a pico y la potencia de salida máxima es:

$$P_{out(max)} = \frac{MPP^2}{8R_L} \quad (11-10)$$

□ Disipación de potencia en el transistor

Si no hay una señal que excite al amplificador de la Figura 11-9a, la potencia de disipación es:

$$P_{DQ} = V_{CEQ} I_{CQ} \quad (11-11)$$

Esto tiene sentido. Dice que la disipación de potencia es igual a la tensión de continua aumentada un número de veces igual a la corriente continua.

Cuando aparece una señal, la potencia de disipación del transistor disminuye, ya que el transistor transforma alguna de la potencia estacionaria en potencia de señal. Por esta razón, la disipación de potencia sin señal es el peor de los casos. De esta forma, la limitación de potencia del transistor en un amplificador de clase A debe ser mayor que P_{DQ} ; de otra manera, el transistor se destruirá.

□ Consumo de corriente

Como muestra la Figura 11-9a, la fuente de tensión de corriente continua proporciona una corriente I_{dc} al amplificador. Esta corriente tiene dos componentes: la corriente de polarización a través del divisor de tensión y la corriente de colector que atraviesa el transistor. A esta corriente se le llama *consumo de corriente* de la etapa. Si tenemos un amplificador multietapa, tendremos que sumar los consumos de corriente individuales para obtener el total.

□ Rendimiento

La potencia que aporta la fuente de alimentación de continua al amplificador es:

$$P_{dc} = V_{CC}I_{dc} \quad (11-12)$$

Para comparar los diseños de amplificadores de potencia, podemos usar el *rendimiento*, definido como:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100 \% \quad (11-13)$$

Esta ecuación nos indica que el rendimiento es igual a la potencia de salida para señal dividida entre la potencia de entrada de continua.

El rendimiento de cualquier amplificador está entre el 0 y el 100 por 100. El rendimiento nos proporciona un método para comparar dos diseños distintos, ya que nos indica lo bien que un amplificador transforma la potencia continua de entrada en potencia alterna de salida. El mayor rendimiento se dará cuando el amplificador transforme toda la potencia continua de entrada en potencia alterna de salida. Esto es importante en los equipos que funcionan con pilas, ya que si el rendimiento es grande, las pilas tendrán una mayor duración.

Como todas las resistencias excepto la de carga tienen pérdidas de potencia, el rendimiento es menor del 100 por 100 en los amplificadores de clase A. De hecho, el máximo rendimiento de los amplificadores de clase A con resistencia de colector y una resistencia de carga separada es del 25 por 100.

En algunas aplicaciones, el bajo rendimiento de los amplificadores de clase A es aceptable. Por ejemplo, la etapa para señales pequeñas del princi-

pio de un sistema normalmente trabaja con rendimientos bajos, ya que la potencia de entrada de continua es pequeña. De hecho, si la etapa final del sistema necesita entregar sólo unos cientos de milivatios, el consumo de corriente en la fuente de potencia puede ser lo suficientemente bajo como para ser aceptable. Pero cuando la etapa final necesita entregar vatios de potencia, el consumo de corriente normalmente es demasiado para el funcionamiento en clase A.

EJEMPLO 11-4

Si la tensión de salida pico a pico es de 6.3 V y la impedancia de entrada a la base es de $3\text{ k}\Omega$, ¿cuál es la ganancia de potencia en la Figura 11-10a?

SOLUCION

En el circuito equivalente para continua de la Figura 11-10b, la impedancia de entrada de la etapa es:

$$Z_{in(etapa)} = 10\text{ k}\Omega \parallel 2.2\text{ k}\Omega \parallel 3\text{ k}\Omega = 1.13\text{ k}\Omega$$

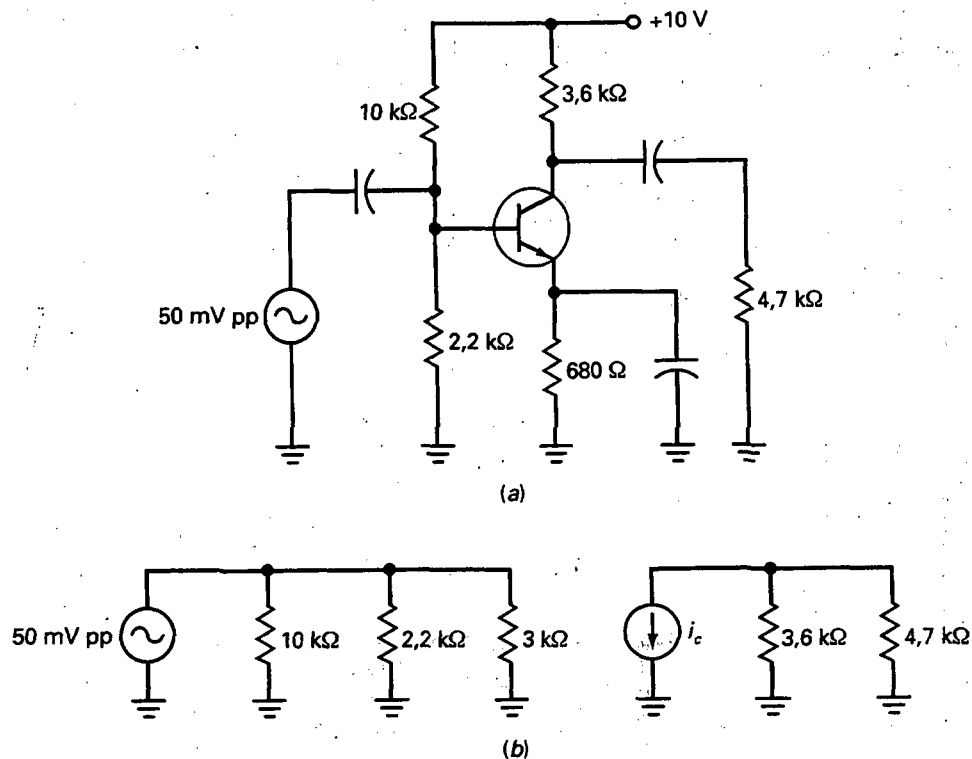


Figura 11-10. Ejemplo.

La potencia de entrada de continua es:

$$P_{in} = \frac{(50 \text{ mV})^2}{8(1,13 \text{ k}\Omega)} = 0,277 \text{ }\mu\text{W}$$

La potencia de salida de alterna es:

$$P_{out} = \frac{(6,2 \text{ V})^2}{8(4,7 \text{ k}\Omega)} = 1,02 \text{ mW}$$

La ganancia de potencia es:

$$G = \frac{1,02 \text{ mW}}{0,277 \text{ }\mu\text{W}} = 3.682$$

EJEMPLO 11-5

¿Cuál es la potencia disipada por el transistor de la Figura 11-10a?

SOLUCIÓN

La corriente continua de emisor es:

$$I_E = \frac{1,1 \text{ V}}{680 \text{ }\Omega} = 1,62 \text{ mA}$$

La tensión continua de colector vale:

$$V_C = 10 \text{ V} - (1,62 \text{ mA})(3,6 \text{ k}\Omega) = 4,17 \text{ V}$$

y la tensión continua emisor-colector:

$$V_{CEQ} = 4,17 \text{ V} - 1,1 \text{ V} = 3,07 \text{ V}$$

La disipación de potencia en el transistor es:

$$P_{DQ} = V_{CEQ} I_{CQ} = (3,07 \text{ V})(1,62 \text{ mA}) = 4,97 \text{ mW}$$

EJEMPLO 11-6

¿Cuál es el rendimiento de la Figura 11-10a?

SOLUCIÓN

La corriente de polarización que atraviesa el divisor de tensión es:

$$I_{polarización} = \frac{10 \text{ V}}{12,2 \text{ k}\Omega} = 0,82 \text{ mA}$$

La corriente de colector sin señal es 1,62 mA, hallada en el ejemplo anterior. El consumo de corriente es:

$$I_{dc} = 0,82 \text{ mA} + 1,62 \text{ mA} = 2,44 \text{ mA}$$

La potencia de entrada de continua a la etapa es:

$$P_{dc} = V_{cc} I_{dc} = (10 \text{ V})(2,44 \text{ mA}) = 24,4 \text{ mW}$$

Como la potencia de salida de alterna es 1,02 mW (hallada en el Ejemplo 11-4), el rendimiento de la etapa es:

$$\eta = \frac{1,02 \text{ mW}}{24,4 \text{ mW}} \times 100\% = 4,2\%$$

EJEMPLO 11-7

Describe el funcionamiento de la Figura 11-11

SOLUCIÓN

Es un amplificador de clase A alimentando un altavoz. El amplificador está polarizado con divisor de tensión, y la señal de entrada está acoplada por transformador con la base. El transistor proporciona una tensión y una ganancia de potencia al altavoz a través del transformador de salida.

Un pequeño altavoz con una impedancia de 3,2 Ω necesita solo 100 mW para funcionar. Un altavoz ligeramente mayor con una impedancia de 8 Ω necesita de 300 a 500 mW. De esta forma, un amplificador de potencia de clase A como el de la Figura 11-11 puede ser adecuado si todo lo que necesitamos son unos cientos de milivatios de potencia de salida. Como la resistencia de carga es también la resistencia de colector para alterna, el rendimiento

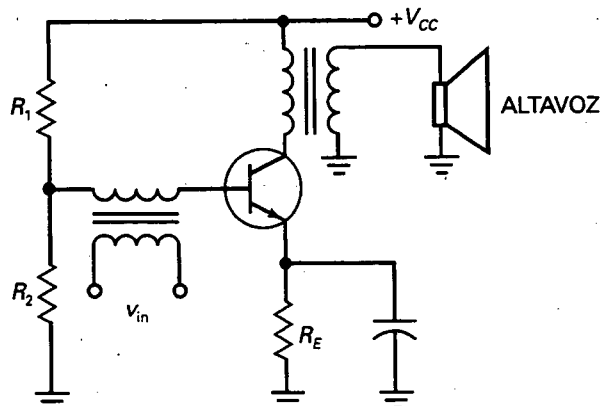


Figura 11-11. Amplificador de potencia de clase A.

de este amplificador de clase A es mayor que en el amplificador de clase A visto anteriormente.

El amplificador de clase A anterior tiene una resistencia de colector R_C y una resistencia de carga separada R_L . Lo mejor que podemos hacer en este caso es igualar las impedancias, $R_L = R_C$, para conseguir el máximo rendimiento del 25 por 100. Cuando la resistencia de carga coincide con la resistencia de colector para alterna, como muestra la Figura 11-11, esta recibe el doble de potencia de salida y el máximo rendimiento aumenta hasta el 50 por 100.

11-4. FUNCIONAMIENTO EN CLASE B

La clase A es la forma más común de operar un transistor en circuitos lineales, ya que es el primero en simplicidad y el circuito polarizado más estable. Pero con el funcionamiento en clase A no se alcanza el mayor rendimiento. En algunas aplicaciones, como sistemas de baterías de potencia, el consumo de corriente y el rendimiento de la etapa son consideraciones importantes para el diseño. Esta sección introduce las ideas básicas del funcionamiento en clase B.

□ Circuito en contrafase

La Figura 11-12 muestra un amplificador básico en clase B. Cuando el transistor funciona en clase B, recorta la mitad del ciclo. Para evitar la distorsión resultante, podemos usar dos transistores en contrafase configurados como muestra la Figura 11-12. *Contrafase* significa que un transistor conduce durante medio ciclo mientras el otro no funciona, y viceversa.

Así es como trabaja: en el semiciclo positivo de la tensión de entrada, el espiral secundario de T_1 tiene unas tensiones de v_1 y v_2 . De esta forma, el transistor superior conduce y el inferior permanece cortado. La corriente

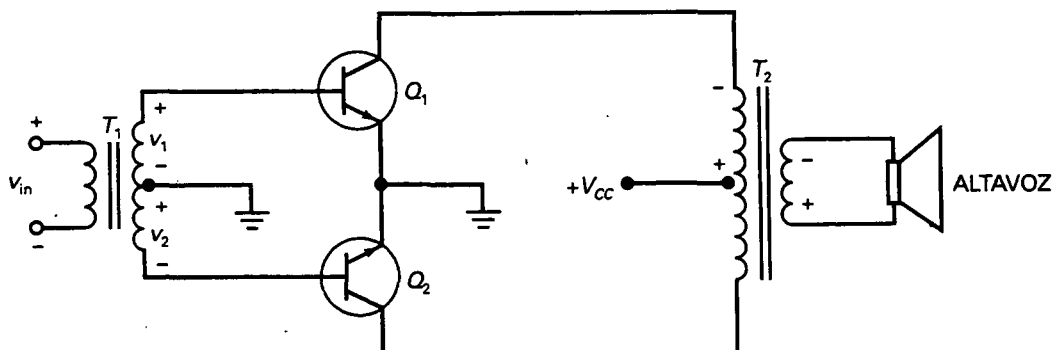


Figura 11-12. Amplificador de clase B en contra fase.

de colector a través de Q_1 circula por la mitad superior del espiral primario de salida. Esto provoca que el amplificador tenga una tensión invertida, acoplada por transformador al altavoz.

En el semiciclo de tensión de entrada, se invierten las polaridades. Ahora, el transistor inferior conduce y el transistor superior permanece cortado. El transistor inferior amplifica la señal, y el semiciclo de alterna llega al altavoz.

Como cada transistor amplifica una mitad del ciclo de entrada, el altavoz recibe un ciclo completo de señal amplificada.

❑ Ventajas y desventajas

Como no hay polarización en la Figura 11-12, cada transistor está en corte cuando no tiene señal de entrada, lo que resulta una ventaja, pues no hay consumo de corriente cuando la señal es cero.

Otra ventaja es el aumento del rendimiento cuando hay una señal de entrada. El máximo rendimiento de un amplificador de clase B en contrafase es del 78,5 por 100, por lo que un amplificador de potencia de clase B en contrafase se usa más comúnmente como etapa de salida que un amplificador de potencia de clase A.

La principal desventaja del amplificador que se muestra en la Figura 11-12 es el uso de transformadores. Los transformadores de audio son pesados y caros. Aunque fueron muy usados en su momento, un amplificador con acoplamiento por transformador ha dejado de ser usual. Los nuevos diseños han eliminado la necesidad de transformadores en la mayoría de las aplicaciones. En el siguiente capítulo trataremos de estos nuevos diseños.

11-5. FUNCIONAMIENTO EN CLASE C

Con la clase B, necesitamos circuitos de contrafase. Por esto, la mayoría de los amplificadores de clase B son amplificadores en contrafase. Con la clase C, necesitamos usar circuitos resonantes para la carga. Por ello, la mayoría de amplificadores de clase C son amplificadores sintonizados.

❑ Frecuencia de resonancia

Con el funcionamiento en clase C, la corriente de colector circula durante menos de un semiciclo. Un circuito resonante en paralelo puede filtrar los pulsos de corriente de colector y producir una señal seno pura de tensión de salida. La principal aplicación para la clase C son los amplificadores sintonizados de RF. El máximo rendimiento de un amplificador sintonizado de clase C es del 100 por 100.

La Figura 11-13a muestra un amplificador sintonizado de RF. La tensión de entrada de alterna alimenta la base y aparece una tensión de salida amplificada en el colector. La señal amplificada e invertida está acoplada por condensador a la resistencia de carga. Debido al circuito resonante en

paralelo, la tensión de salida es máxima en la frecuencia de resonancia, dada por:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11-14)$$

En el resto de frecuencias, la ganancia de tensión cae como muestra la Figura 11-13b. Por esta razón, un amplificador sintonizado de clase C es comúnmente usado para amplificar bandas estrechas de frecuencia. Esto lo hace ideal para amplificar señales de radio y televisión, ya que cada estación o canal está asignado a una estrecha banda de frecuencias a ambos lados de la frecuencia central.

El amplificador de clase C está sin polarizar, como muestra el circuito equivalente de la Figura 11-13c. La resistencia R_s en el circuito del colector es la resistencia serie de la autoinducción.

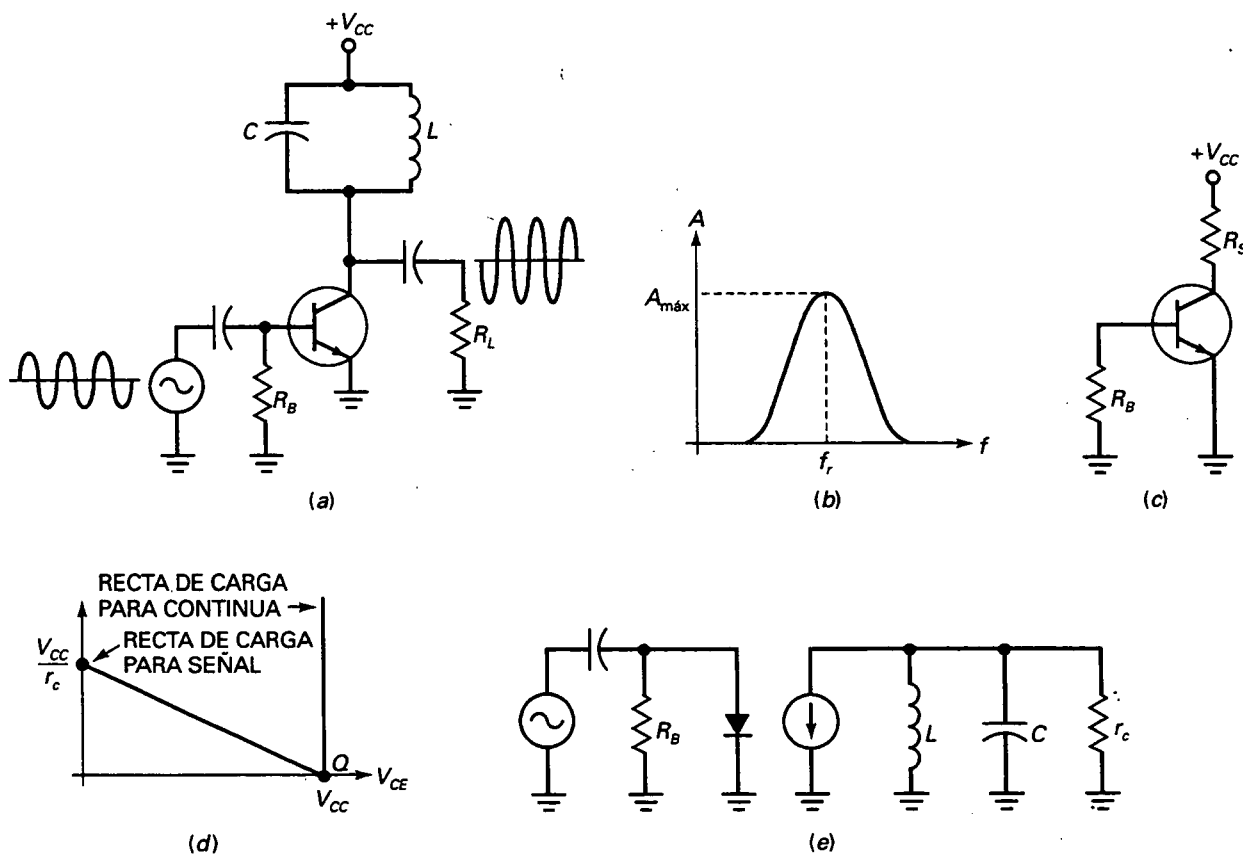


Figura 11-13. a) Amplificador sintonizado en clase C; b) ganancia de tensión frente a frecuencia; c) el circuito equivalente para continua está sin polarizar; d) dos rectas de carga; e) circuito equivalente para corriente alterna.

□ Recta de carga

La Figura 11-13d muestra las dos rectas de carga. La recta de carga para continua es aproximadamente vertical, ya que la resistencia de la autoinducción R_s es muy pequeña. La recta de carga para continua no es importante, ya que el transistor no está polarizado. La que es importante es la recta de carga para alterna. Como se indica, el punto Q está en el extremo inferior de la recta de carga. Cuando una señal está presente, el funcionamiento instantáneo mueve el punto Q hacia arriba a través de la recta de cargas hacia el punto de saturación. El pulso máximo de la corriente de colector viene dado por la corriente de saturación V_{CC}/r_c .

□ Desplazamiento de corriente continua de la señal de entrada

La Figura 11-13e es el circuito equivalente para alterna. La señal de entrada excita el diodo emisor, y los pulsos de corriente amplificada llegan al circuito resonante. En un amplificador de clase C sintonizado, el condensador de entrada es causante del desplazamiento negativo. Por esta razón, la señal que aparece en el emisor está negativamente desplazada.

La Figura 11-14a ilustra este desplazamiento negativo. Solamente los picos positivos de la señal de entrada llegan al diodo emisor. Por esta razón, la corriente de colector circula en pulsos cortos como los de la Figura 11-14b.

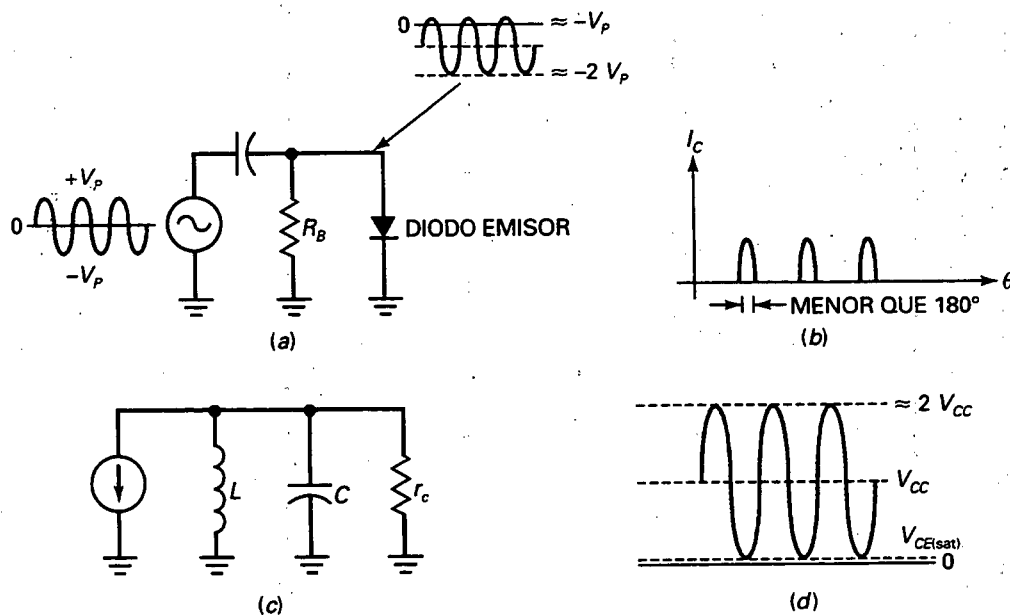


Figura 11-14. a) Señal de entrada desplazada negativamente en la base; b) la corriente de colector fluye en pulsos; c) circuito de colector de corriente alterna; d) onda de tensión en el colector.

❑ Filtrando los armónicos

En el Capítulo 5 se trató brevemente el concepto de armónicos. La idea básica es ésta: una onda no sinusoidal como la de la Figura 11-14b es rica en *armónicos*, múltiplos de la frecuencia de entrada. En otras palabras, los pulsos de la Figura 11-14b son equivalentes a un grupo de ondas tipo seno con frecuencias f , $2f$, $3f$, ..., nf .

El circuito resonante de la Figura 11-14c tiene una alta impedancia solamente en la frecuencia fundamental f . Esto produce una gran ganancia de tensión en la frecuencia fundamental.

Por otro lado, el circuito resonante tiene una impedancia muy baja para los armónicos superiores, lo que provoca una ganancia de tensión muy pequeña. Es por esto por lo que la tensión que atraviesa el circuito resonante es casi como la onda tipo seno pura de la Figura 11-14d. Como todos los armónicos superiores son filtrados, sólo la frecuencia fundamental aparece en el circuito resonante.

❑ Detección de averías

Como los amplificadores de clase C sintonizados tienen una señal desplazada negativamente, podemos usar un voltímetro con una alta impedancia para medir la tensión en el diodo emisor. Si el circuito funciona correctamente, tendremos lecturas de tensión negativas aproximadamente iguales al pico de la señal de entrada.

El test de voltímetro puede ser útil cuando no tengamos un osciloscopio a mano. Con el osciloscopio, sin embargo, obtendremos una comprobación más uniforme de lo que ocurre en el diodo emisor. Veríamos una onda negativamente desplazada cuando el circuito funcione correctamente.

EJEMPLO 11-8

Describir lo que ocurre en la Figura 11-15.

SOLUCIÓN

El circuito tiene una frecuencia de resonancia de:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.1\text{ nH})(470\text{ pF})}} = 15.19\text{ MHz}$$

Si la señal de entrada tiene esta frecuencia, el circuito de clase C sintonizado amplifica la señal de entrada.

En la Figura 11-15 la señal de entrada tiene un valor de 10 V pico a pico. La señal está desplazada negativamente a la base del transistor con un pico positivo de -0.7 V y un pico negativo de -9.3 V. La tensión de la base tiene una variación de 4.3 V, la cual podremos medir con un voltímetro de impedancia alta.

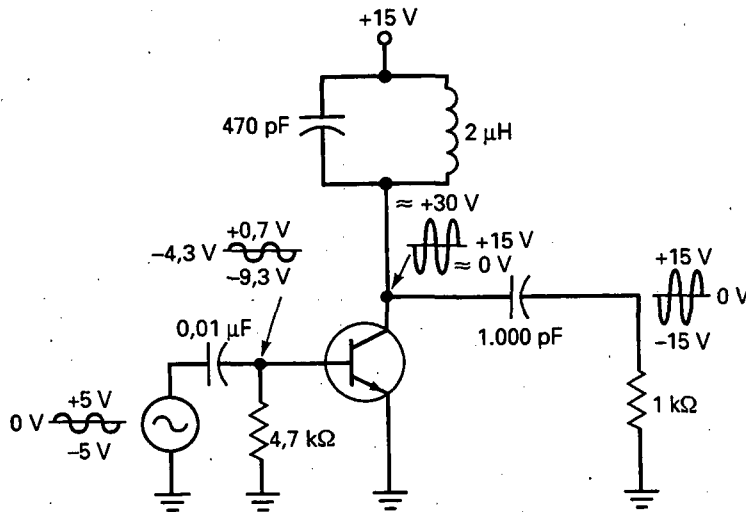


Figura 11-15. Ejemplo.

La señal de colector está invertida debido a la conexión de CE. La corriente continua o diferencia de tensión de la onda del colector es de +15 V sobre la tensión de alimentación. Por tanto, la tensión de colector pico a pico es de 30 V. Esta tensión estaba acoplada por condensador a la resistencia de carga. La tensión de salida final tiene un pico positivo de +15 V y un pico negativo de -15 V.

11-6. ECUACIONES DE LA CLASE C

Un amplificador de clase C sintonizado se usa normalmente como amplificador de banda estrecha. La señal de entrada en un circuito de clase C se amplifica obteniendo grandes potencias de salida con un rendimiento aproximado del 100 por 100.

□ Ecuaciones universales

Algunas de las ecuaciones utilizadas para la clase A son también aplicables a la clase B y C. A continuación se ofrece una lista de ecuaciones que se pueden aplicar a todas las clases de funcionamiento:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (\text{ganancia de potencia})$$

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{8R_L} \quad (\text{potencia de salida para alterna})$$

$$P_{out(m\acute{a}x)} = \frac{MPP^2}{8R_L} \quad (\text{m\acute{a}xima potencia de salida para alterna})$$

$$P_{dc} = V_{CC}I_{dc} \quad (\text{potencia de entrada para corriente continua})$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100 \% \quad (\text{rendimiento})$$

□ Ancho de banda

Como se discutió en el curso básico, el *ancho de banda* (BW) de un circuito resonante viene definido como:

$$BW = f_2 - f_1 \quad (11-15)$$

donde f_1 = frecuencia de potencia media inferior;
 f_2 = frecuencia de potencia media superior.

La frecuencia de potencia media es igual a la frecuencia en la cual la ganancia en tensión es 0,707 veces la ganancia máxima, como se muestra en la Figura 11-16. A menor BW , se estrechará el ancho de banda del amplificador.

Con la Ecuación (11-15) es posible conseguir esta nueva ecuación para el ancho de banda:

$$BW = \frac{f_r}{Q} \quad (11-16)$$

donde Q es el factor de calidad del circuito. La Ecuación (11-16) nos dice que el ancho de banda es inversamente proporcional a Q . A mayor valor de Q en el circuito, menor ancho de banda.

Los amplificadores de clase C casi siempre tienen un circuito donde Q es mayor que 10. Esto quiere decir que el ancho de banda es menor que 10 por 100 de la frecuencia de resonancia. Por esta razón, los amplificadores de clase C son amplificadores de banda estrecha. La salida de un amplificador de banda estrecha es una tensión sinusoidal grande en resonancia con rápidas caídas cuando no está en resonancia.

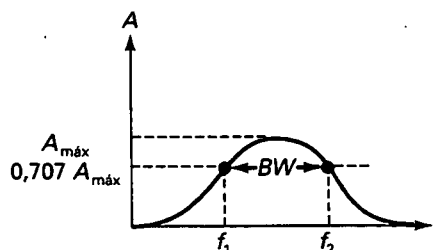


Figura 11-16. Ancho de banda.

□ Caída de corriente para resonancia

Cuando un circuito LC está en resonancia, la impedancia de carga para alterna para la corriente de colector es máxima y puramente resistiva. Por tanto, la corriente de colector es mínima en resonancia. Por arriba y debajo de la resonancia, la impedancia de carga de alterna decrece y la corriente de colector aumenta.

Una forma de sintonizar un circuito LC resonante es observando las disminuciones de corriente continua suministradas al circuito, como muestra la Figura 11-17. La idea básica es medir la corriente I_{dc} de la fuente de potencia cuando el circuito está sintonizado (variando L o C). Cuando el circuito se pone en resonancia para una frecuencia de entrada, la lectura del amperímetro caerá al valor mínimo. Éste indica que el circuito está correctamente sintonizado, ya que alcanza la máxima impedancia en este punto.

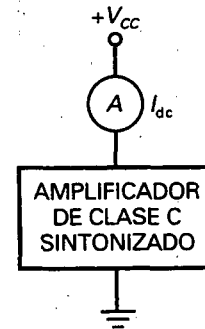


Figura 11-17. La corriente disminuye en la frecuencia de resonancia.

□ Resistencia de colector para corriente alterna

Cualquier autoinducción tiene una resistencia en serie R_s , como se indica en la Figura 11-18a. El valor de Q para autoinducción está definido como:

$$Q_L = \frac{X_L}{R_s} \quad (11-17)$$

donde Q_L = factor de calidad de la bobina

X_L = reactancia inductiva

R_s = resistencia de la bobina

Recordar que éste es el valor de Q solamente para la autoinducción. El circuito completo tiene una Q menor, ya que incluye el efecto de la resistencia de carga.

Como dijimos en el curso básico, la resistencia en serie de una autoinducción puede ser sustituida por una resistencia en paralelo R_p , como se muestra en la Figura 11-18b. Cuando Q es mayor que 10, esta resistencia equivalente viene dada por:

$$R_p = Q_L X_L \quad (11-18)$$

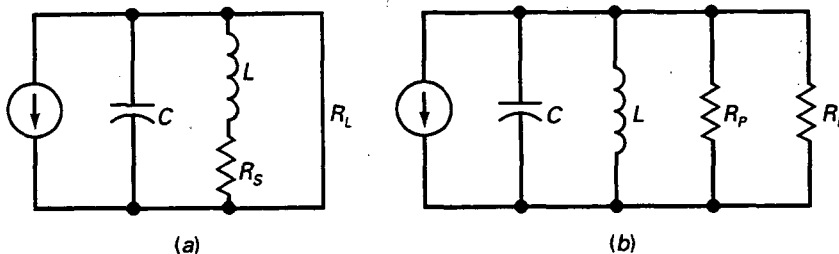


Figura 11-18. a) Resistencia serie equivalente para la autoinducción; b) resistencia paralelo equivalente para la autoinducción.

En la Figura 11-18b, X_L cancela a X_C en el punto de resonancia, quedando sólo R_p en paralelo con R_L . Por ello, la resistencia vista desde el colector en resonancia es:

$$r_c = R_p \parallel R_L \quad (11-19)$$

El valor de Q para el circuito total viene dado por:

$$Q = \frac{r_c}{X_L} \quad (11-20)$$

En este circuito, Q es menor que Q_L , factor de calidad de la bobina. En la práctica, en los amplificadores de clase \tilde{c} , el valor de Q_L es típicamente 50 o mayor. Como el valor de Q total es 10 o más, el funcionamiento es de banda estrecha.

□ Ciclo de trabajo

La breve excitación del diodo emisor en cada pico positivo produce estrechos pulsos de corriente de colector, como muestra la Figura 11-19a. Con pulsos como éstos, es conveniente definir el *ciclo de trabajo* como:

$$D = \frac{W}{T} \quad (11-21)$$

donde D = ciclo de trabajo
 W = anchura del pulso
 T = período el pulso

Por ejemplo, si un osciloscopio muestra un pulso de $0,2 \mu s$ y un período de $1,6 \mu s$, el ciclo el trabajo es:

$$D = \frac{0,2 \mu s}{1,6 \mu s} = 0,125$$

Tan pequeño será el ciclo de trabajo como sean estrechos los pulsos comparados con el período. Un amplificador típico de clase C tiene un ciclo de trabajo pequeño. De hecho, el rendimiento de un amplificador de clase C aumenta cuando el ciclo de trabajo disminuye.

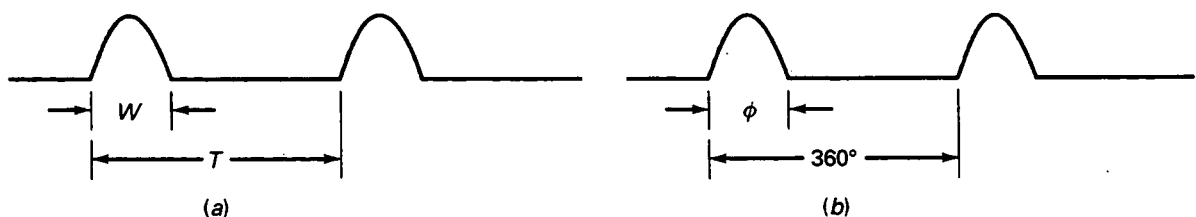


Figura 11-19. Ciclo de trabajo.

□ Ángulo de conducción

Una forma equivalente de estudiar el ciclo de trabajo es usando el ángulo de conducción ϕ , que podemos ver en la Figura 11-19b:

$$D = \frac{\phi}{360^\circ} \quad (11-22)$$

Por ejemplo, si el ángulo de conducción es de 18° , el ciclo de trabajo es:

$$D = \frac{18^\circ}{360^\circ} = 0,05$$

□ Disipación de potencia en el transistor

La Figura 11-20a muestra la tensión ideal colector-emisor en un transistor amplificador de clase C. En la Figura 11-20a, la máxima salida viene dada por:

$$MPP = 2V_{CC} \quad (11-23)$$

Como la tensión máxima es aproximadamente $2V_{CC}$, el transistor deberá de tener una V_{CEO} mayor que $2V_{CC}$.

La Figura 11-20b muestra la corriente de colector para un amplificador de clase C. Normalmente, el ángulo de conducción ϕ es muy inferior a 180° .

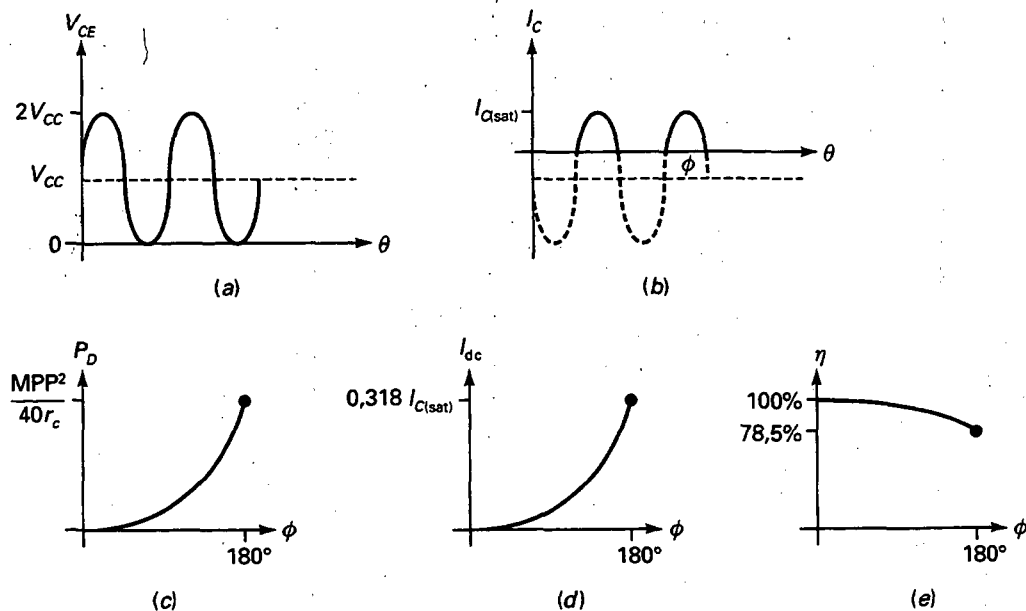


Figura 11-20. a) Salida máxima; b) ángulo de conducción; c) disipación de potencia en el transistor; d) consumo de corriente; e) rendimiento.

Fíjese en que la corriente de colector alcanza un valor máximo en $I_{C(sat)}$. El transistor debe de tener en sus características un pico de corriente superior a esto. La parte del ciclo dibujada con línea discontinua representa el tiempo que el transistor está en corte.

La potencia de disipación en el transistor depende del ángulo de conducción. Como se muestran la Figura 11-20c, la potencia de disipación se incrementa cuando el ángulo de conducción está por encima de 180° . La potencia máxima de disipación de un transistor puede ser calculada a partir de:

$$P_D \approx \frac{MPP^2}{40r_c} \quad (11-24)$$

La Ecuación (11-24) representa el peor de los casos. Un transistor funcionando en clase C debe tener unas características de potencia mayores que esto o se destruirá. En condiciones normales de operación, el ángulo de conducción debe ser mucho menor que 180° y la potencia de disipación de un transistor será menor que $MPP^2/40r_c$.

□ Rendimiento de la etapa

La corriente continua de colector depende del ángulo de conducción. Para un ángulo de conducción de 180° (una señal de media onda), la media de corriente continua en el colector es $I_{C(sat)}/\pi$. Para ángulos de conducción mayores, la corriente continua de colector es menor que esto, como muestra la Figura 11-20d. La corriente de colector continua es la única que afecta al consumo de corriente en un amplificador de clase C, ya que no hay resistencias de polarización.

En un amplificador de clase C, la mayor parte de la potencia de entrada en continua es transformada en potencia de carga en alterna, ya que las pérdidas en el transistor y en la bobina son pequeñas. Por esta razón, un amplificador de clase C tiene un rendimiento de etapa alto.

La Figura 11-20e muestra cómo el rendimiento óptimo para la etapa varía con el ángulo de conducción. Cuando el ángulo de conducción es de 180° , el rendimiento de la etapa es del 78,5 por 100, el máximo teórico para un amplificador de clase B. Cuando el ángulo de conducción disminuye, el rendimiento de la etapa aumenta. Como ya indicamos, la clase C tiene un rendimiento máximo del 100 por 100, cuando nos acercamos a ángulos de conducción muy pequeños.

EJEMPLO 11-9

Si Q_{β} vale 100 en la Figura 11-21, ¿cuál es el ancho de banda del amplificador?

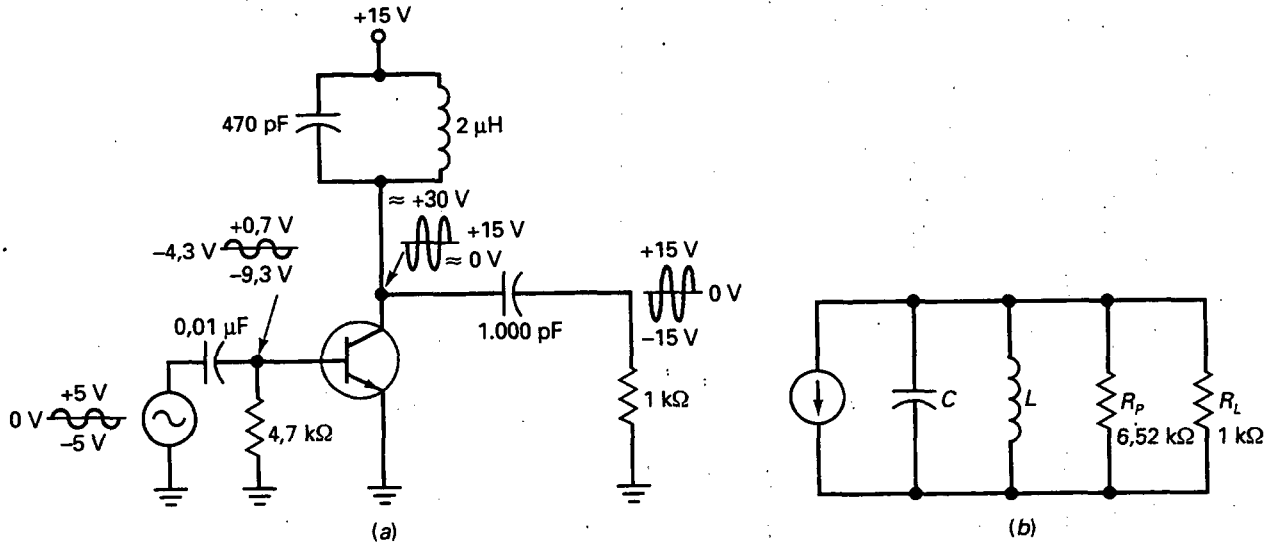


Figura 11-21. Ejemplo.

SOLUCIÓN

Para la frecuencia de resonancia (hallada en el Ejemplo 11-8):

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(5.19 \text{ MHz})(2 \mu\text{H}) = 65.2 \Omega$$

Con la Ecuación (11-18), la resistencia en paralelo equivalente para la bobina es:

$$R_p = Q^2 X_L = (100)(65.2 \Omega) = 867 \Omega$$

Esta resistencia está en paralelo con la resistencia de carga, como muestra la Figura 11-21b. De esta forma, la resistencia de colector es:

$$r_c = 6.52 \text{ k}\Omega \parallel 1 \text{ k}\Omega = 867 \Omega$$

Con la Ecuación (11-20), la Q total del circuito vale:

$$Q = \frac{r_c}{X_L} = \frac{867 \Omega}{65.2 \Omega} = 13.3$$

Como la frecuencia de resonancia es de 5.19 MHz, el ancho de banda es:

$$BW = \frac{5.19 \text{ MHz}}{13.3} = 390 \text{ kHz}$$

EJEMPLO 11-10

En la Figura 11-21a, ¿cuál es el peor caso de disipación de potencia?

SOLUCIÓN

La salida máxima pico a pico es:

$$MPP = 2V_{ce} = 2(15\text{ V}) = 30\text{ V}_{pp}$$

La Ecuación (11-24) nos da el peor caso de potencia disipada en el transistor:

$$P_D = \frac{MPP^2}{40r_c} = \frac{(30\text{ V})^2}{40(867\ \Omega)} = 26\text{ mW}$$

11-7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN TRANSISTOR

La temperatura en la unión del colector impone un límite a la disipación máxima de potencia P_D . Según sea el tipo de transistor, una temperatura de la unión en el intervalo de 150 a 200°C destruirá al transistor. En las hojas de características esta temperatura máxima de la unión se indica como $T_{J(\text{máx})}$. Por ejemplo, la hoja de características de un 2N3904 indica una $T_{J(\text{máx})}$ de 150°C; la hoja de características de un 2N3719 indica una $T_{J(\text{máx})}$ de 200°C.

❑ Temperatura ambiente

El calor producido en la unión pasa a través del encapsulado (de metal o de plástico) del transistor y se irradia al aire circundante. La temperatura del aire, conocida como *temperatura ambiente*, se halla alrededor de los 25°C, pero en los días calurosos puede ser mucho más elevada. Además, la temperatura ambiente puede ser mucho más alta dentro de un equipo electrónico.

❑ Factor de ajuste

En las hojas de características con frecuencia se indica la $P_{D(\text{máx})}$ de un transistor para una temperatura ambiente de 25°C. Por ejemplo, el 2N1936 tiene una $P_{D(\text{máx})}$ de 4 W para una temperatura ambiente de 25°C. Este hecho significa que un 2N1936, empleado en un amplificador de clase A, puede tener una disipación de potencia de hasta 4 W. Siempre que la temperatura ambiente sea de 25°C o menor, el transistor se hallará dentro de la limitación de potencia indicada.

¿Qué se puede hacer si la temperatura ambiente supera los 25°C? Se tiene que reducir la limitación de potencia. En las hojas de características

viene incluida a veces una curva de ajuste como la que se muestran la Figura 11-22. Como puede observarse, la limitación de potencia disminuye al aumentar la temperatura ambiente. Por ejemplo, a una temperatura ambiente de 100°C, la limitación de potencia es de 2 W.

Algunas hojas de características no incluyen una curva de ajuste como la de la Figura 11-22; tan sólo indican un factor de ajuste D . Por ejemplo, el factor de ajuste para un 2N1936 es 26,7 mW/°C. Este dato significa que hay que restar 26,7 mW por cada grado que la temperatura ambiente esté por encima de los 25°C. Expresado en símbolos:

$$\Delta P = D(T_A - 25^\circ\text{C}) \quad (11-25)$$

donde:

ΔP = decremento en el límite máximo de potencia

D = factor de ajuste

T_A = temperatura ambiente

Como ejemplo, si la temperatura ambiente se elevase a 75°C, habría que reducir la limitación de potencia en:

$$\Delta P = 26,7 \text{ mW}(75 - 25) = 1,34 \text{ W}$$

Como el límite de potencia es de 4 W a 25°C, la nueva limitación de potencia sería de:

$$P_{D(\text{máx})} = 4 \text{ W} - 1,34 \text{ W} = 2,66 \text{ W}$$

y este hecho concuerda con la curva de ajuste de la Figura 11-22.

Ya sea que la limitación de potencia se obtenga de una curva de ajuste como la de la Figura 11-22, o bien de una fórmula como la Ecuación (11-25), el hecho importante que debe considerarse es que la limitación de potencia disminuirá al elevarse la temperatura ambiente. El hecho de que un circuito funcione bien a 25° no es garantía de lo que hará también en

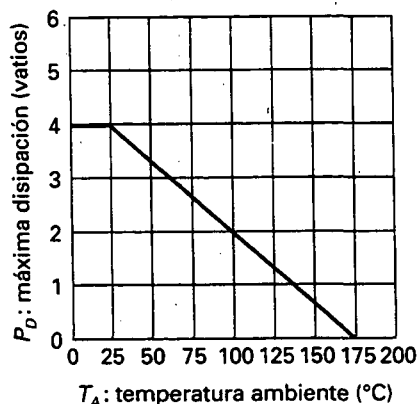


Figura 11-22. Característica de potencia frente a temperatura ambiente.

un amplio intervalo de temperatura. Por tanto, al diseñar un circuito es necesario tener en cuenta el intervalo de temperatura de funcionamiento ajustando todos los transistores para la máxima temperatura ambiente esperada.

❑ Disipadores de calor

Una forma de aumentar la potencia máxima disipada por un transistor consiste en deshacerse con mayor rapidez del calor. Para tal fin se usan los disipadores de calor. Si se aumenta el área superficial del encapsulado del transistor, se permite que el calor escape más fácilmente hacia el aire circundante. Observe la Figura 11-23a. Cuando este tipo de disipador de calor se ajusta al encapsulado del transistor, el calor se irradia más rápidamente debido al incremento del área proporcionada por las aletas.

En la Figura 11-23b se muestra un transistor de potencia con encapsulado metálico. El encapsulado metálico proporciona un camino de salida del transistor para el calor. Este encapsulado metálico se puede sujetar al chasis del equipo electrónico. Como el chasis es un disipador masivo de calor, el calor puede escapar fácilmente del transistor hacia el chasis.

Los transistores de potencia elevada, como el de la Figura 11-23c, tienen el colector conectado directamente a la cápsula para permitir que el calor escape tan fácilmente como le sea posible. El encapsulado del transistor se conecta al chasis. Para evitar que el colector se ponga en cortocircuito con la masa del chasis, se sitúa una delgada lámina de mica entre el encapsulado del transistor y el chasis. Lo importante en este caso es que el calor puede escapar más rápidamente del transistor; así, el transistor puede tener una mayor disipación de potencia para la misma temperatura ambiente.

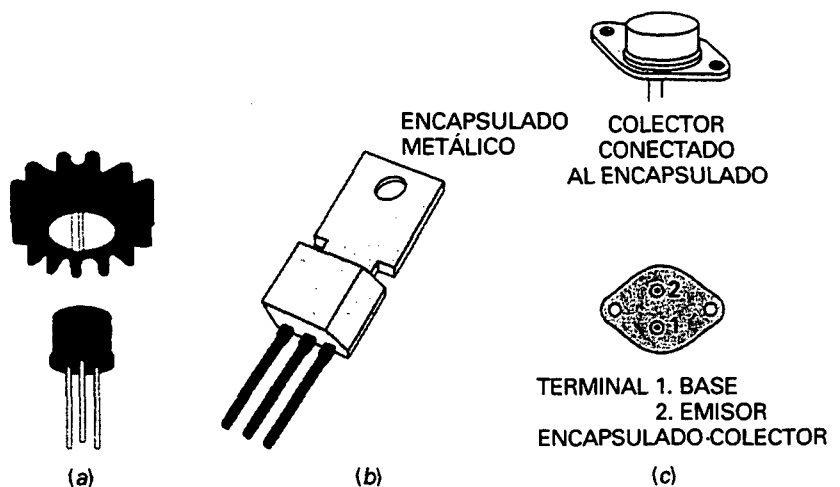


Figura 11-23. a) Disipador de calor ajustable; b) transistor de potencia con encapsulado metálico; c) transistor de potencia con el colector conectado al encapsulado.

❑ Temperatura del encapsulado

Cuando el calor sale de un transistor, pasa a través del encapsulado del transistor hacia el disipador de calor, y después éste irradia el calor hacia el aire circundante. La temperatura del encapsulado del transistor, T_c , será ligeramente superior a la temperatura del disipador de calor, T_s , que, a su vez, será ligeramente mayor que la temperatura ambiente, T_a .

En las hojas de características para los transistores de gran potencia, se incluyen curvas de ajuste para la temperatura del encapsulado en vez de para la temperatura ambiente. Por ejemplo, en la Figura 11-24 se muestra la curva de ajuste para un 2N5877. La potencia máxima es de 150 W a una temperatura del encapsulado de 25°C; luego decrece linealmente con la temperatura hasta llegar a cero para una temperatura del encapsulado de 200°C.

A veces, lo que se tiene es un factor de ajuste en vez de una curva de ajuste. En tal caso, se puede aplicar la ecuación siguiente para calcular la reducción en la limitación de potencia:

$$\Delta P = D(T_c - 25^\circ\text{C}) \quad (11-26)$$

donde:

ΔP = decremento en el límite máximo de potencia

D = factor de ajuste

T_c = temperatura del encapsulado

Para utilizar la curva de ajuste de un transistor de potencia elevada, es necesario saber cuál será la temperatura del encapsulado en el peor de los casos. Después, se pueden hacer los ajustes para obtener la potencia máxima.

EJEMPLO 11-1

El circuito de la Figura 11-25 debe funcionar en un intervalo de temperatura ambiente de 0 a 50°C. ¿Cuál es la máxima potencia que puede disipar el transistor en las peores condiciones de temperatura?

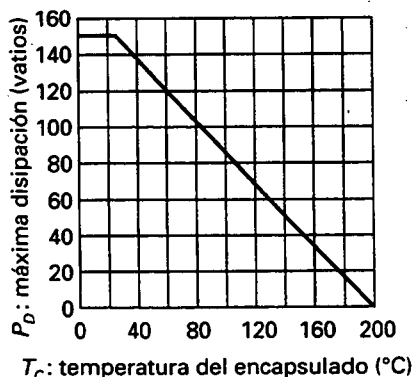


Figura 11-24. Característica de potencia frente a la temperatura del encapsulado.

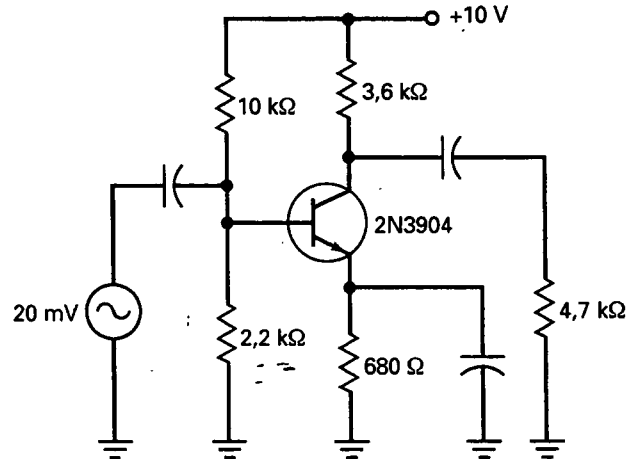


Figura 11-25. Ejemplo.

SOLUCIÓN

La temperatura del peor de los casos es la más elevada. Hay que realizar un ajuste de la potencia máxima proporcionada en la hoja de características. Si se busca en la hoja de características de 2N3904, en el Apéndice, se verá que la potencia máxima es:

$$P_D = 625 \text{ mW a } 25^\circ\text{C ambiente}$$

y que el factor de ajuste es:

$$D = 5 \text{ mW/}^\circ\text{C}$$

Con la Ecuación (11-25) se puede calcular:

$$\Delta P = (5 \text{ mW/}^\circ\text{C})(50 - 25) = 125 \text{ mW}$$

Por tanto, la potencia máxima a 50°C es:

$$P_{D(\text{max})} = 625 \text{ mW} - 125 \text{ mW} = 500 \text{ mW}$$

RESUMEN

Sección 11-1. Clasificación de amplificadores

Las clases de funcionamiento son A, B y C. Los tipos de acoplamiento son por condensador, por transformador y directo. La clasificación por frecuencia distingue de audio, radio frecuencia, banda estrecha y banda ancha. En los de audio distinguimos los preamplificadores y los amplificadores de potencia.

Sección 11-2. Dos rectas de carga

Todo amplificador tiene una recta de carga para corriente continua y otra para corriente alterna. Para conseguir la salida máxima pico a pico, el punto Q deberá estar en el centro de la recta de carga para corriente alterna.

Sección 11-3. Funcionamiento en clase A

La ganancia en potencia es igual la potencia de salida para alterna dividido entre la potencia de entrada para alterna. Las características técnicas de potencia para el transistor deben ser mayores que la disipación de potencia sin señal de entrada. El rendimiento de una etapa amplificación es igual a la potencia de salida en alterna dividido entre la potencia de entrada para continua, en tanto por ciento. El rendimiento máximo para la clase A con resistencia de colector y de carga es del 25 por 100. Si la resistencia de carga es la resistencia de colector, el rendimiento máximo aumenta hasta el 50 por 100.

Sección 11-4. Funcionamiento en clase B

La mayoría de los amplificadores en clase B usan conexiones en contrafase de dos transistores. Mientras un transistor conduce, el otro permanece en corte, y viceversa. Cada transistor amplifica medio ciclo de señal. El rendimiento máximo de la clase B es 78,5 por 100.

Sección 11-5. Funcionamiento en clase C

La mayoría de los amplificadores de clase C son amplificadores de radiofrecuencia sintonizados. La señal de entrada está negativamente desplazada, lo que provoca estrechos pulsos de corriente de colector. El circuito resonante está sintonizado a la frecuencia fundamental, por lo que todos los armónicos superiores son filtrados.

Sección 11-6. Ecuaciones de la clase C

El ancho de banda en los amplificadores de clase C es inversamente proporcional al valor de Q para el circui-


to. La resistencia de colector está formada por la resistencia equivalente del paralelo de la autoinducción y la resistencia de carga.

Sección 11-7. Características técnicas de un transistor

El rango de potencia de un transistor disminuye cuando la temperatura aumenta. Las hojas de características de un transistor mostrarán un factor de ajuste o una gráfica de disipación de potencia frente temperatura. Los disipadores de calor pueden eliminar el calor más rápidamente, con lo que conseguimos una mayor disipación de potencia.

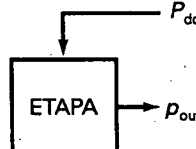
DEFINICIONES

(11-7) Ganancia de potencia:



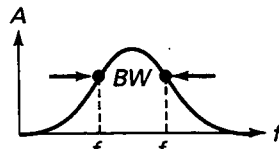
$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

(11-13) Rendimiento:



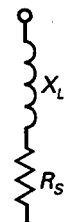
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100 \%$$

(11-15) Ancho de banda:



$$BW = f_2 - f_1$$

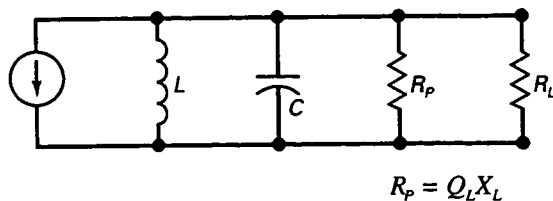
(11-17) Q para la autoinducción:



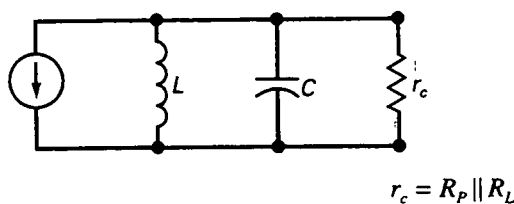
$$Q_L = \frac{X_L}{R_S}$$

398 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

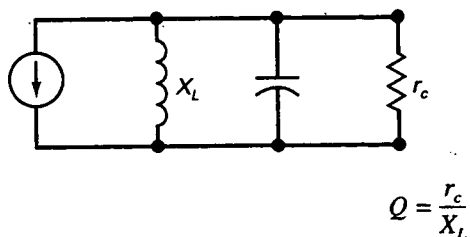
(11-18) Resistencia en paralelo equivalente:



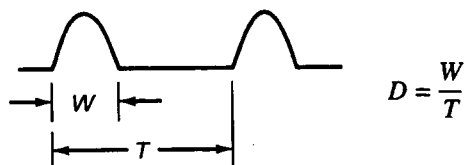
(11-19) Resistencia de colector para corriente alterna:



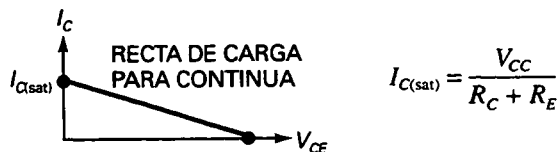
(11-20) Q del amplificador:



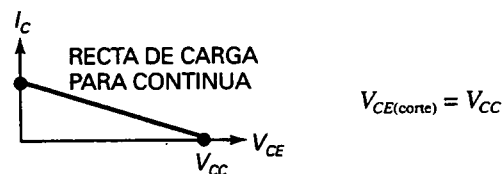
(11-21) Ciclo de trabajo:

**DERIVACIONES**

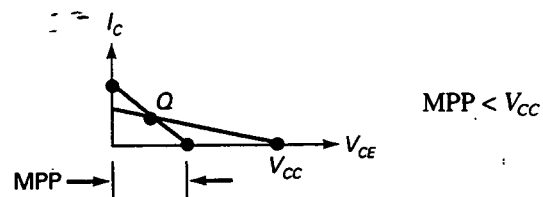
(11-1) Corriente de saturación:



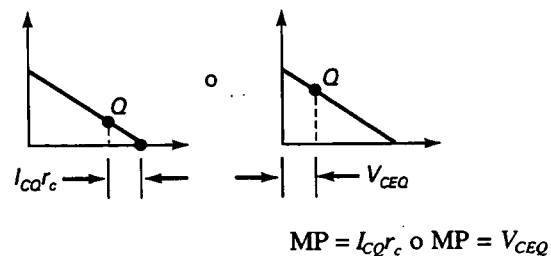
(11-2) Tensión de corte:



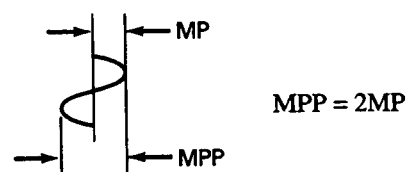
(11-3) Límite de salida:



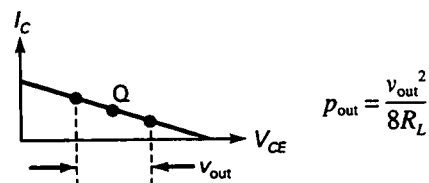
(11-4) Pico máximo:



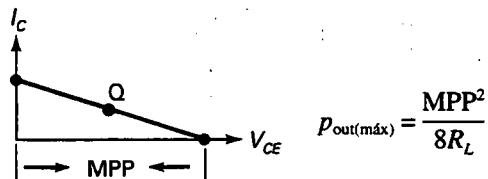
(11-5) Máxima salida pico a pico:



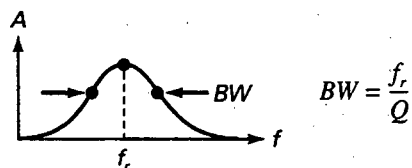
(11-9) Potencia de salida:



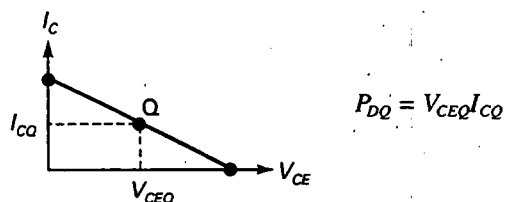
(11-10) Salida máxima:



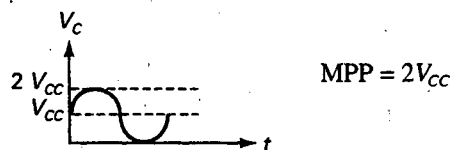
(11-16) Ancho de banda:



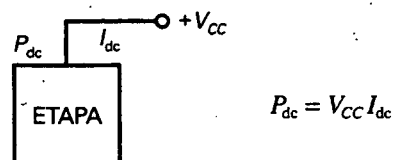
(11-11) Potencia del transistor:



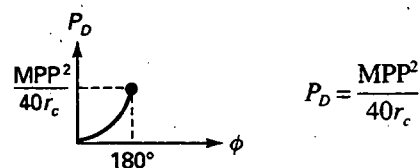
(11-23) Salida máxima:



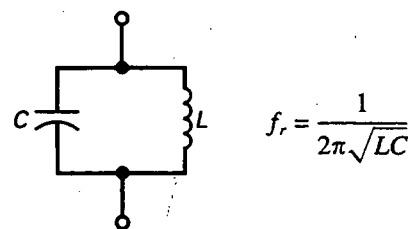
(11-12) Potencia de entrada de corriente continua:



(11-24) Disipación de potencia:



(11-14) Frecuencia de resonancia:



EJERCICIOS PARA EL ALUMNO

CUESTIONES

- Para el funcionamiento en clase B, la corriente de colector circula por
 - Todo el ciclo
 - Medio ciclo
 - Menos de medio ciclo
 - Menos de un cuarto de ciclo
- El acoplamiento por transformador es un ejemplo de
 - Acoplamiento directo
 - Acoplamiento para corriente alterna

400 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

- c) Acoplamiento para corriente continua
d) Acoplamiento por impedancia
3. Un amplificador de audio funciona a un rango de frecuencias de
a) 0 a 20 Hz
b) 20 Hz a 20 kHz
c) 20 a 200 kHz
d) Por encima de 20 kHz
4. Un amplificador radiofrecuencia sincronizado es
a) De banda estrecha
b) De banda ancha
c) Acoplado directamente
d) Un amplificador de continua
5. La primera etapa de un preamplificador es
a) Una etapa de radiofrecuencia sintonizada
b) Una señal grande
c) Una señal pequeña
d) Un amplificador de continuo
6. Para conseguir una tensión máxima de salida pico a pico, el valor del punto Q deberá estar
a) Cerca de la saturación
b) Cerca del corte
c) En el centro de la recta de carga para corriente continua
d) En el centro de la recta de carga para corriente alterna
7. Un amplificador tiene dos rectas de carga, ya que
a) Tiene resistencias de colector para corriente continua y alterna
b) Tiene dos circuitos equivalentes
c) La corriente continua se comporta de una forma y la corriente alterna de otra
d) Todos los anteriores
8. Cuando el punto Q está en el centro de la recta de carga para alterna, la tensión de salida máxima pico a pico es igual a
a) V_{CEQ}
b) $2V_{CEQ}$
c) I_{CQ}
d) $2I_{CQ}$
9. Un circuito en contrafase es casi siempre usado con
a) La clase A
b) La clase B
c) La clase C
d) Todas las anteriores
10. Una de las ventajas de los amplificadores en contrafase de la clase B es que
a) No hay consumo de corriente sin señal
b) El rendimiento máximo es del 78,5 por 100
c) Tiene un mayor rendimiento que la clase A
d) Todas las anteriores
11. Los amplificadores de clase C son casi siempre
a) Acoplamientos por transformador entre dos etapas
b) Funcionan en frecuencias de audio
c) Amplificadores de radiofrecuencia sintonizados
d) De banda ancha
12. La señal de entrada de un amplificador de clase C
a) Está negativamente desplazada en la base
b) Está amplificada e invertida
c) Produce pulsos cortos de corriente de colector
d) Todo lo anterior
13. La corriente de colector de un amplificador de clase C
a) Es una versión amplificada de la tensión de entrada
b) Tiene armónicos
c) Está negativamente desplazada
d) Circula durante medio ciclo
14. El ancho de banda de un amplificador de clase C disminuye cuando
a) La frecuencia de resonancia aumenta
b) Q aumenta
c) X_L disminuye
d) La resistencia de carga disminuye
15. La disipación en el transistor de un amplificador de clase C disminuye cuando
a) La frecuencia de resonancia aumenta
b) El valor de Q para la bobina aumenta
c) La resistencia de carga disminuye
d) Aumenta la capacitancia
16. Las características de potencia de un transistor se pueden aumentar
a) Aumentando la temperatura
b) Con un disipado de calor
c) Usando la curva de ajuste
d) Funcionando sin señal de entrada
17. La recta de carga para corriente alterna es la misma que la recta de carga para corriente continua cuando la resistencia de colector para alterna es igual a
a) La resistencia de emisor para corriente continua
b) La resistencia de emisor para corriente alterna
c) La resistencia de colector para corriente continua
d) La tensión de alimentación dividido entre la corriente de colector
18. Si $R_C = 3,6 \text{ k}\Omega$ y $R_L = 10 \text{ k}\Omega$, la resistencia de carga para alterna es igual a
a) $10 \text{ k}\Omega$
b) $2,65 \text{ k}\Omega$
c) $1 \text{ k}\Omega$
d) $3,6 \text{ k}\Omega$
19. La corriente de colector sin señal es la misma que
a) La corriente de colector continua
b) La corriente de colector alterna
c) La corriente total del colector
d) La corriente del divisor de tensión
20. La recta de carga para corriente alterna normalmente
a) Es igual a la recta de carga para corriente continua

- b) Tiene menos pendiente que la recta de carga para corriente continua
 - c) Está más inclinada que la recta de carga para corriente continua
 - d) Es horizontal
21. Para un punto Q cerca del centro de la recta de carga para corriente continua, es más probable que el recorte ocurra en
- a) Los picos positivos de la tensión de entrada
 - b) Los picos negativos de la tensión de salida
 - c) Los picos positivos de la tensión de salida
 - d) Los picos negativos de la tensión de emisor
22. En un amplificador de clase A, la corriente del colector circula a
- a) Menos de medio ciclo
 - b) Medio ciclo
 - c) Menos de todo el ciclo
 - d) El ciclo completo
23. Con la clase A, la señal de salida debería ser
- a) Sin recortar
 - b) Recortada en los picos de tensión positivos
 - c) Recortada en los picos de tensión negativos
 - d) Recortada en los picos de corriente negativos
24. El punto de funcionamiento instantáneo oscila a lo largo de
- a) La recta de carga para corriente alterna
 - b) La recta de carga para corriente continua
 - c) Por ambas rectas
 - d) Por ninguna de las rectas de carrera
25. El consumo de corriente de un amplificador es el
- a) Total de la corriente alterna del generador
 - b) Total de la corriente continua de la fuente
 - c) La ganancia de corriente de la base al colector
 - d) La ganancia de corriente del colector a la base
26. La ganancia de potencia de un amplificador
- a) Es la misma que la ganancia de tensión
 - b) Es más pequeña que la ganancia de tensión
 - c) Es igual a la potencia de salida dividida entre la potencia de entrada
 - d) Es igual a la potencia de carga
27. Los disipadores de calor disminuyen
- a) La potencia del transistor
 - b) La temperatura ambiente
 - c) La temperatura de la unión
 - d) La corriente de colector
28. Cuando la temperatura ambiente aumenta, la característica de potencia máxima del transistor
- a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) Se mantiene igual
 - d) Ninguna de las anteriores

29. Si la potencia de carga es de 3 mW y la potencia de continua es de 150 mW, rendimiento es
- a) 0
 - b) 2 por 100
 - c) 3 por 100
 - d) 20 por 100

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

1. Hable acerca de las tres clases de funcionamiento de los amplificadores. Ilustre la explicación dibujando la onda de corriente del colector.
2. Dibuje en un breve esquema los tres tipos de acoplamiento usados entre etapas amplificadoras.
3. Dibuje un amplificador PDT. Después, dibuje sus rectas de cargas para corriente continua y alterna. Suponiendo que el punto Q está en el centro de la recta de carga para corriente alterna, ¿cuál es la corriente de saturación alterna? ¿La tensión de corte para alterna? ¿La salida máxima pico a pico?
4. Dibuje un circuito de amplificador en dos etapas y explique cómo calcula el consumo total de corriente de la fuente.
5. Dibuje un amplificador sintonizado de clase C. Diga cómo calcula la frecuencia de resonancia y qué ocurre con la señal alterna en la base. Explique cómo es posible que los pulsos cortos en el colector produzcan una onda seno de tensión en el circuito resonante.
6. ¿Cuál es la aplicación más común de los amplificadores de clase C? ¿Podrían estos amplificadores usarse para aplicaciones de audio? Si no es así, ¿por qué no?
7. Explique la razón de los disipadores de calor. ¿Por qué ponemos una lámina de mica entre el transistor y el disipador de calor?
8. ¿Qué entendemos por ciclo de trabajo? ¿Cómo está relacionado con la potencia de alimentación suministrada por la fuente?
9. Defina Q .
10. ¿Cuál de las clases de funcionamiento de los amplificadores tiene un mayor rendimiento? ¿Por qué?
11. Usted tiene que cambiar un transistor y un disipador de calor. En la caja el disipador de calor contiene un paquete con una sustancia blanca. ¿Qué es?
12. Comparando un amplificador de clase A y uno de clase C, ¿cuál tiene la mayor fidelidad? ¿Por qué?
13. ¿Qué tipo de amplificador se usa cuando sólo queremos amplificar un pequeño rango de frecuencias?
14. ¿Con qué otros tipos de amplificadores está usted familiarizado?

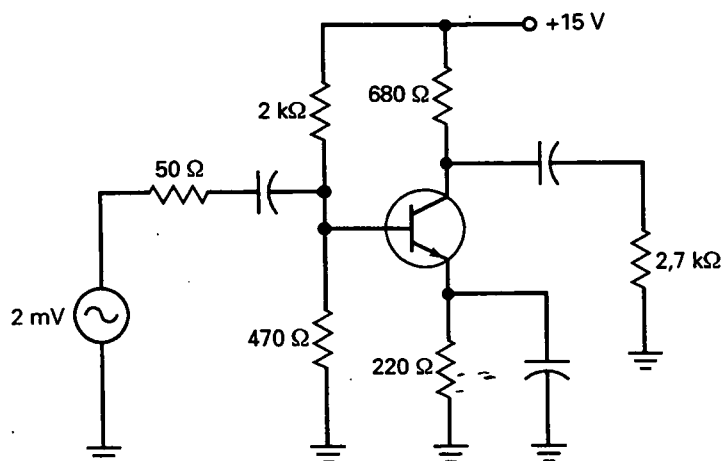


Figura 11-26

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 11-2. Dos rectas de carga

- 11-1. ¿Cuál es la resistencia de colector de continua en la Figura 11-26? ¿Cuánto vale la corriente de saturación para continua?
- 11-2. ¿Cuál es la resistencia de colector alterna en la Figura 11-26? Si el punto *Q* está aproximadamente en el medio de la recta de carga para alterna, ¿cuál es la corriente de saturación para alterna?
- 11-3. ¿Cuál es la salida máxima pico a pico en la Figura 11-26?
- 11-4. Todas las resistencias se doblan en la Figura 11-26. ¿Cuál es la resistencia de colector para alterna?
- 11-5. Todas las resistencias se triplican en la Figura 11-26. ¿Cuál es la salida máxima pico a pico?
- 11-6. ¿Cuál es la resistencia de colector de continua en la Figura 11-27? ¿Cuál es la corriente de saturación para continua?
- 11-7. ¿Cuál es la resistencia de colector alterna en la Figura 11-27? Si el punto *Q* está aproximadamente en el medio de la recta de carga para alterna, ¿cuál es la corriente de saturación para alterna?
- 11-8. ¿Cuál es la salida máxima pico a pico en la Figura 11-27?
- 11-9. Todas las resistencias se doblan en la Figura 11-27. ¿Qué valor tiene la resistencia de colector para alterna?
- 11-10. Todas las resistencias se triplican en la Figura 11-27. ¿Cuál es la salida máxima pico a pico?

Sección 11-3. Funcionamiento en clase A

- 11-11. Un amplificador tiene una potencia de entrada de 4 mW y una potencia de salida de 2 W. ¿Cuál es la ganancia de potencia?
- 11-12. Si un amplificador tiene una tensión de salida pico a pico de 15 V en la resistencia de carga de 1 kΩ, ¿cuál es la ganancia de potencia si la potencia de entrada es de 400 μW?
- 11-13. ¿Cuál es el consumo de corriente en la Figura 11-26?
- 11-14. ¿Cuál es la potencia de alimentación de continua del amplificador de la Figura 11-26?
- 11-15. La señal de entrada de la Figura 11-26 aumenta hasta una tensión de salida máxima

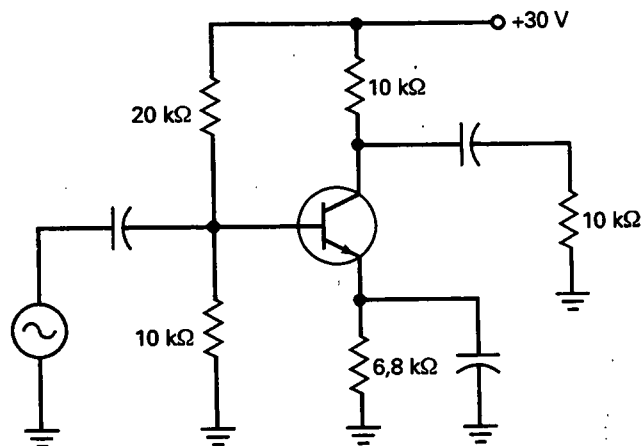


Figura 11-27

pico a pico sobre la resistencia de carga.
¿Cuál es el rendimiento?

- 11-16. ¿Cuál es la disipación de potencia sin señal en la Figura 11-26?
- 11-17. ¿Cuál es el consumo de corriente en la Figura 11-27?
- 11-18. ¿Cuál es la potencia de alimentación de continua del amplificador de la Figura 11-27?
- 11-19. La señal de entrada de la Figura 11-27 aumenta hasta una tensión de salida máxima pico a pico sobre la resistencia de carga. ¿Cuál es el rendimiento?
- 11-20. ¿Cuál es la disipación de potencia sin señal en la Figura 11-27?
- 11-21. Si $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ en la Figura 11-28, ¿cuál es la corriente continua en el emisor?
- 11-22. El altavoz de la Figura 11-28 es equivalente a una resistencia de carga de $3,2 \Omega$. Si la tensión a través del altavoz es de 5 V pp , ¿cuál es la potencia de salida? ¿Cuál es el rendimiento?

Sección 11-5. Funcionamiento en clase C

- 11-23. Si la tensión de entrada vale 5 V rms en la Figura 11-29, ¿cuál es la tensión de entrada pico a pico? Si medimos la tensión de corriente continua entre la base y tierra, ¿qué marcará el voltímetro?
- 11-24. ¿Cuál es la frecuencia de resonancia en la Figura 11-29?
- 11-25. Si doblamos la autoinducción en la Figura 11-29, ¿cuál es la frecuencia de resonancia?
- 11-26. ¿Cuál es la frecuencia de resonancia en la Figura 11-29 si cambiamos la capacidad del condensador a 100 pF ?

Sección 11-6. Ecuaciones de la clase C

- 11-27. Si el amplificador de clase C de la Figura 11-29 tiene una potencia de salida de 11 mW y una potencia de entrada de $50 \text{ }\mu\text{W}$, ¿cuál es la ganancia de potencia?
- 11-28. ¿Cuál es la potencia de salida en la Figura 11-29 si la tensión de salida es de 50 V pp ?
- 11-29. ¿Cuál es la máxima potencia de salida de alterna en la Figura 11-29?
- 11-30. Si el consumo de corriente en la Figura 11-29 es de $0,5 \text{ mA}$, ¿cuál es la potencia de entrada de continua?
- 11-31. ¿Cuál es el rendimiento de la Figura 11-29 si el consumo de corriente es de $0,4 \text{ mA}$ y la tensión de salida es de 30 V pp ?
- 11-32. Si el valor de Q para la autoinducción es de 125 en la Figura 11-29, ¿cuál es el ancho de banda del amplificador?
- 11-33. ¿Cuál es el peor caso de disipación de potencia en el transistor de la Figura 11-29?

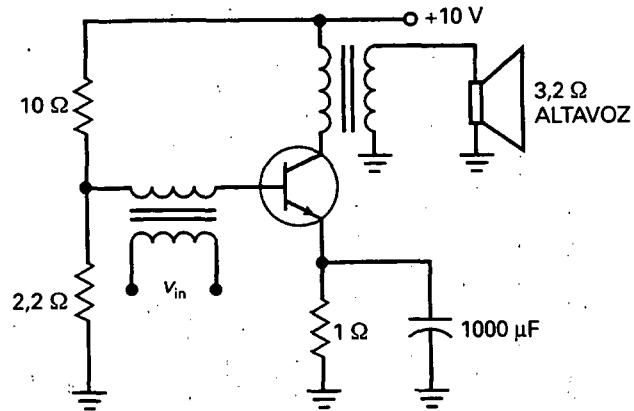


Figura 11-28

Sección 11-7. Características técnicas de un transistor

- 11-34. El transistor de la Figura 11-26 es un 2N3904. Si el circuito tiene que funcionar en una temperatura ambiente de 0 a 100° , ¿cuál es la característica de potencia máxima del transistor en el peor de los casos?
- 11-35. Un transistor tiene una curva de ajuste como la de la Figura 11-22. ¿Cuál es la característica de potencia máxima para una temperatura ambiente de 100°C ?
- 11-36. Las hojas de características de un 2N3055 indican una potencia de 115 W para una temperatura del encapsulado de 25°C . Si el factor de ajuste es de $0,657 \text{ W}/^\circ\text{C}$, ¿cuál es $P_{D(\text{máx})}$ cuando la temperatura del encapsulado es de 90°C ?

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 11-37. La salida de un amplificador es una onda cuadrada incluso si la señal de entrada es de tipo seno. ¿Cuál es la explicación?
- 11-38. Un transistor de potencia como el de la Figura 11-23c se usa en un amplificador. Alguien le dice que como la carcasa está conectada a tierra, puede tocarla sin problema. ¿Qué opina de esto?
- 11-39. Usted está en una librería y lee en un libro de electrónica: «Algunos amplificadores de potencia pueden tener un rendimiento del 125 por 100». ¿Compraría este libro? Explique su respuesta.
- 11-40. Normalmente, la recta de carga para corriente alterna es más vertical que la de corriente continua. Un par de compañeros dicen que están dispuestos a apostar que pueden dibujar un circuito cuya recta de carga para alterna es

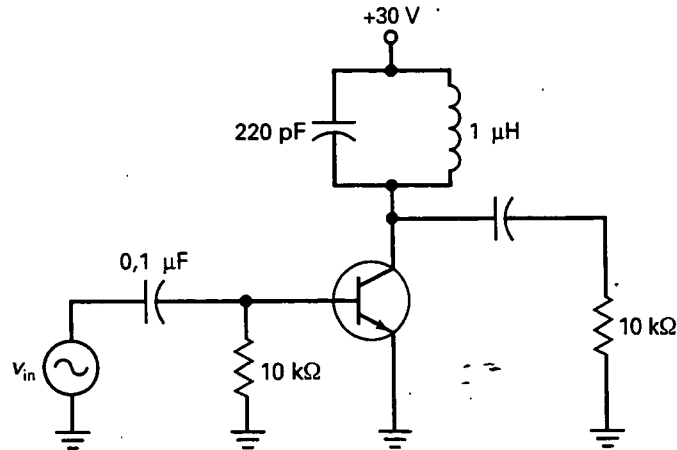


Figura 11-29

menos vertical que la de continua. ¿Aceptaría la apuesta? Razónelo.

- 11-41. Dibuje las rectas de carga para la Figura 11-26.
- 11-42. Dibuje las rectas de carga para cada una de las etapas de la Figura 11-30.
- 11-43. ¿Cuál es el consumo total de corriente en la fuente de potencia de la Figura 11-30? ¿Y la potencia total de continua de entrada?
- 11-44. En la Figura 11-30, ¿está el punto Q de la primera etapa en el centro de la recta de carga de alterna?
- 11-45. En la Figura 11-30, ¿está el punto Q de la segunda etapa en el centro de la recta de carga de alterna?

- 11-46. ¿Cuál es la salida máxima pico a pico para cada etapa de la Figura 11-30.

ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES

En la Figura 11-31, P_L es la potencia de salida en la resistencia de carga, y P_S la potencia de entrada de la fuente.

- 11-47. Predecir la respuesta de las variables dependientes para un ligero aumento de V_{CC} .
- 11-48. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de R_1 .
- 11-49. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de R_2 .

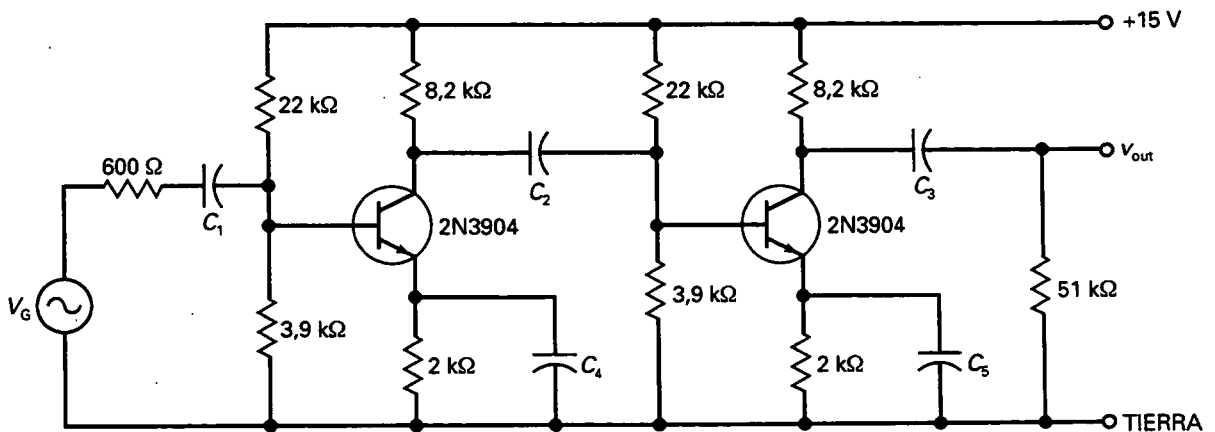
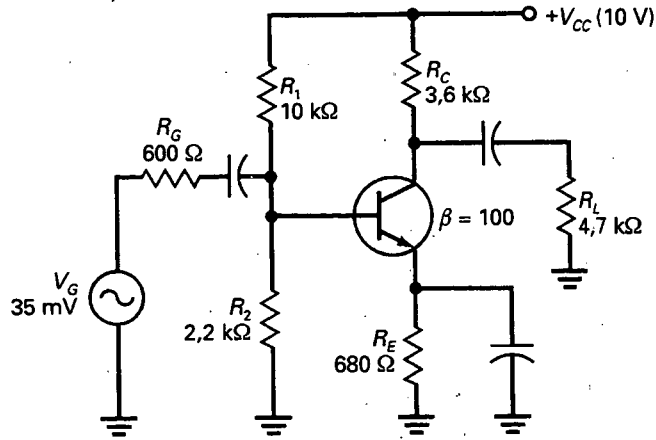


Figura 11-30



	1	2	3	4	5	6
A	A	N	A	N	D	N
B	D	D	D	A	N	A
C	N	A	N	D	D	N
D	D	A	D	N	A	D
E	A	D	D	N	D	N
F	D	A	A	A	N	A

RESPUESTAS

V_{CC}	R_1	R_2
$P_L: D2$	$P_L: E3$	$P_L: A1$
$P_D: F4$	$P_D: A3$	$P_D: D3$
$P_S: B6$	$P_S: C4$	$P_S: B6$
MPP: E5	MPP: D6	MPP: D1
$n: A2$	$n: B1$	$n: A3$
R_E	R_C	V_G
$P_L: F1$	$P_L: A1$	$P_L: A3$
$P_D: D2$	$P_D: D3$	$P_D: C1$
$P_S: F3$	$P_S: C1$	$P_S: F5$
MPP: C5	MPP: A5	MPP: A6
$n: B2$	$n: E1$	$n: C2$
R_G	R_L	β
$P_L: B1$	$P_L: C5$	$P_L: F3$
$P_D: E4$	$P_D: D4$	$P_D: E4$
$P_S: A2$	$P_S: C6$	$P_S: C1$
MPP: D4	MPP: E1	MPP: A6
$n: A5$	$n: A5$	$n: D2$

Figura 11-31

- 11-50. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de R_E .
- 11-51. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de R_C .
- 11-52. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de V_G .
- 11-53. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de R_C .
- 11-54. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de R_L .
- 11-55. Repetir el problema 11-47 para un ligero aumento de β .

22

12

Seguidores de emisor

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Dibujar un esquema de un amplificador en colector común y describir sus ventajas.
- Describir cómo calcular la máxima salida pico a pico para un seguidor de emisor.
- Establecer las ventajas de un transistor Darlington.
- Dibujar un esquema de un amplificador en clase B en contrafase y explicar su funcionamiento.
- Dibujar un esquema de un seguidor zener y explicar cómo incrementa la corriente por la carga de un regulador zener.

VOCABULARIO

- | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| • amplificador en colector común (CC) | • distorsión en el cruce por cero | • funcionamiento en clase B |
| • conexión Darlington | • escape térmico | • par Darlington |
| • Darlington complementario | • etapa excitadora | • seguidor de emisor |
| • diodo compensador | • funcionamiento en clase AB | • seguidor zener |
| | | • transistor Darlington |

Cuando la resistencia de carga es pequeña comparada con la resistencia de colector, la ganancia de tensión de una etapa EC se hace pequeña porque la etapa está *sobrecargada*. Una forma de prevenir la sobrecarga consiste en usar un *seguidor de emisor*. Este tipo de amplificador tiene una gran impedancia de entrada y puede excitar resistencias de carga pequeñas.

Los seguidores de emisor se usan mucho en amplificadores en clase B en contrafase y reguladores de tensión. En general, siempre que sea necesario acoplar una señal de tensión a una impedancia baja, el seguidor de emisor puede ser la solución.

12-1. AMPLIFICADOR EN COLECTOR COMÚN

El seguidor de emisor también se denomina *amplificador en colector común* (CC). La señal de entrada se acopla a la base y la señal de salida se toma del emisor.

❑ Idea básica

En la Figura 12-1a se muestra un seguidor de emisor. Como el colector es masa para señal, el circuito es un amplificador CC. La señal del generador se acopla a la base. Esto produce una corriente alterna de emisor y una tensión alterna en la resistencia de emisor. Esta tensión alterna se acopla entonces a la resistencia de carga.

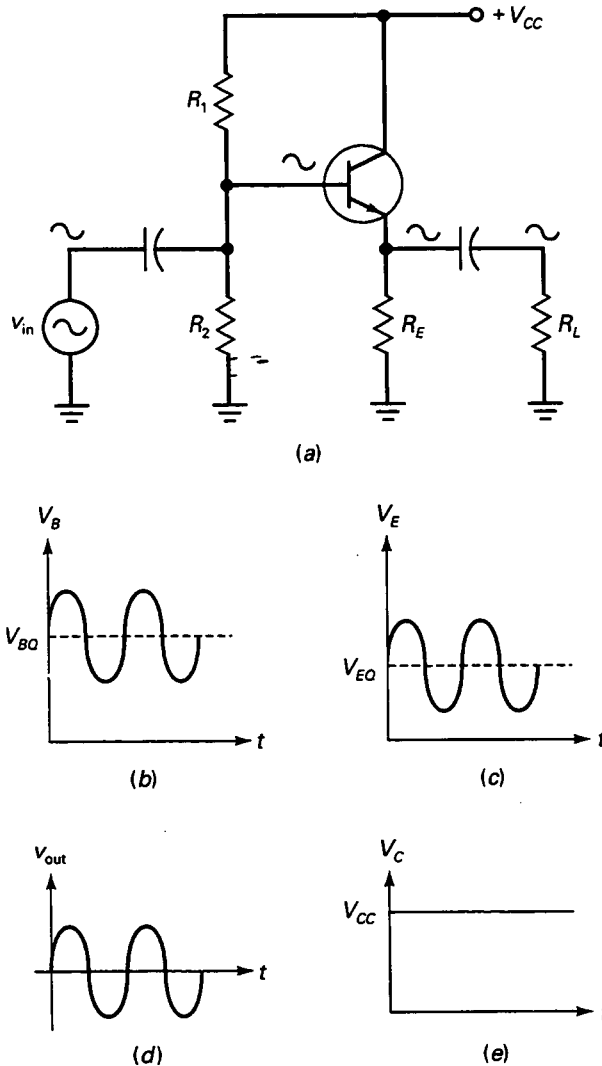


Figura 12-1. Seguidor de emisor y formas de onda.

La Figura 12-1b muestra la tensión total entre la base y masa. Tiene una componente alterna y una componente continua. Como se puede observar, la tensión alterna de entrada se monta sobre la tensión de trabajo de base V_{BQ} . Similarmente, la Figura 12-1c muestra la tensión total entre el emisor y masa. Esta vez la tensión alterna de entrada está centrada en una tensión de trabajo del emisor V_{EQ} .

La tensión alterna de emisor se acopla a la resistencia de carga. Esta tensión de salida se muestra en la Figura 12-1d, una tensión alterna pura. Esta tensión de salida está en fase y es aproximadamente igual a la tensión de entrada. La razón por la que este circuito se denomina *seguidor de emisor* es porque la tensión de salida sigue a la de entrada.

Como no hay resistencia de colector, la tensión total entre el colector y masa es igual a la tensión de la fuente de alimentación. Si se mira la tensión

de colector con un osciloscopio, se verá una tensión constante como la de la Figura 12-1e. No hay tensión alterna en el colector porque es una masa para señal.

❑ Realimentación negativa

Como en el amplificador con el emisor sin desacoplar, en el seguidor de emisor se emplea realimentación negativa. Pero en el seguidor de emisor, la resistencia de realimentación es igual a toda la resistencia de emisor. Debido a ello, la ganancia de tensión es ultraestable, la distorsión casi no existe y la impedancia de entrada de la base es muy alta. La contrapartida es la ganancia de tensión, que tiene un valor máximo de 1.

❑ Resistencia de emisor para señal

En la Figura 12-1a, la señal que sale del emisor ve una resistencia R_E en paralelo con R_L . Definamos la resistencia de emisor para señal como:

$$r_e = R_E \parallel R_L \quad (12-1)$$

Ésta es la resistencia externa de emisor para señal, que es distinta a la resistencia interna para señal r'_e .

❑ Ganancia de tensión

La Figura 12-2a muestra el circuito equivalente para señal con el modelo T. Usando la ley de Ohm, podemos escribir estas dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} v_{\text{out}} &= i_e r_e \\ v_{\text{in}} &= i_e (r_e + r'_e) \end{aligned}$$

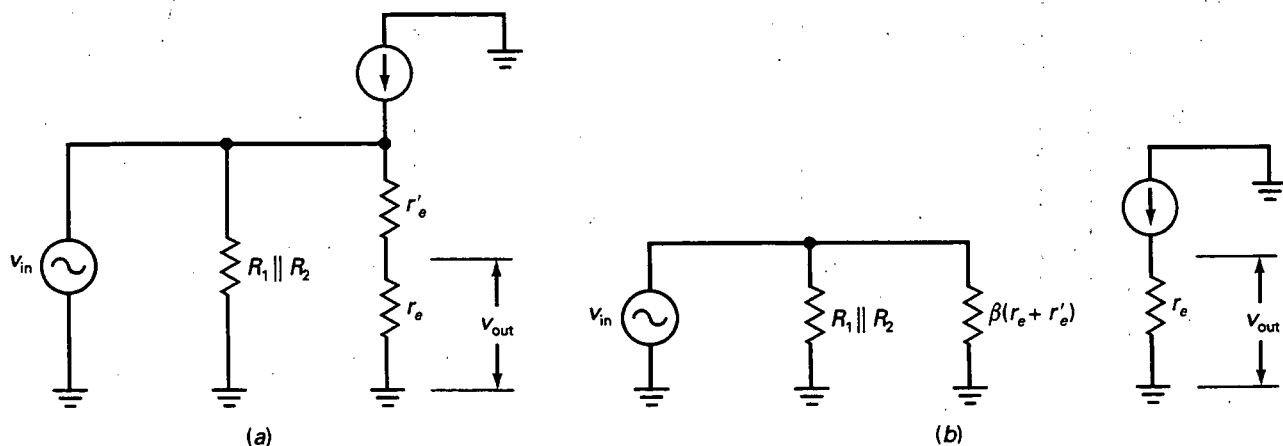


Figura 12-2. Circuitos equivalentes para señal del seguidor de emisor.

Dividiendo la primera ecuación por la segunda, se obtiene la ganancia de tensión del seguidor de emisor:

$$A = \frac{r_e}{r_e + r'_e} \quad (12-2)$$

Normalmente un diseñador hace r_e mucho mayor que r'_e , de tal forma que la ganancia de tensión sea igual a 1 (aproximadamente). Éste es el valor que se usa para todos los análisis preliminares y para detectar averías.

¿Por qué se llama *amplificador* al seguidor de emisor si su ganancia de tensión es sólo 1? Porque tiene una ganancia de corriente de β . Como se mencionó en el capítulo anterior, las etapas cerca del final de un sistema necesitan producir más corriente porque normalmente la carga final tiene una impedancia pequeña. El seguidor de emisor puede producir las grandes corrientes de salida que se necesitan para impedancias de carga pequeñas. En resumen, aunque no es un amplificador de tensión, el seguidor de emisor es un amplificador de corriente o de potencia.

□ Impedancia de entrada de la base

La Figura 12-2b muestra el circuito equivalente para señal con el modelo π de un transistor. Por lo que concierne a la impedancia de entrada de la base, el funcionamiento es igual al de un amplificador con emisor sin desacoplar. La ganancia de corriente transforma la resistencia total de emisor multiplicándola por un factor β . La derivación es, por tanto, idéntica a la de un amplificador con emisor sin desacoplar:

$$z_{in(base)} = \beta(r_e + r'_e) \quad (12-3)$$

Para detección de averías se puede asumir que r_e es mucho mayor que r'_e , lo que significa que la impedancia de entrada es aproximadamente βr_e .

El aumento de impedancia es la mayor ventaja de un seguidor de emisor. Las resistencias de carga pequeñas que pueden sobrecargar un amplificador en EC se pueden usar con un seguidor de emisor porque aumenta la impedancia y previene la sobrecarga.

□ Impedancia de entrada de la etapa

Cuando la fuente de señal no es constante, algo de la señal alterna se pierde en la resistencia interna. Si se quiere calcular el efecto de la resistencia interna se necesita usar la impedancia de entrada de la etapa, dada por:

$$z_{in(etapa)} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta(r_e + r'_e) \quad (12-4)$$

Con la impedancia de entrada y la resistencia de la fuente se puede usar el divisor de tensión para calcular la tensión de entrada que llega a la base. Los cálculos son iguales a los que se mostraron en capítulos anteriores.

EJEMPLO 12-1

¿Cuánto vale la impedancia de entrada de la base en el circuito de la Figura 12-3 si $\beta = 200$? ¿Cuánto vale la impedancia de entrada de la etapa?

SOLUCIÓN

Como cada una de las resistencias en el divisor de tensión es de $10\text{ k}\Omega$, la tensión continua de base es la mitad de la tensión de la fuente, o sea, 5 V . La tensión continua en el emisor se reduce en $0,7\text{ V}$, es decir, es de $4,3\text{ V}$. La corriente continua en el emisor es igual a $4,3\text{ V}$ dividido entre $4,3\text{ k}\Omega$, es decir, 1 mA . Por tanto, la resistencia para señal en el diodo emisor es:

$$r_e = \frac{25\text{ mV}}{1\text{ mA}} = 25\ \Omega$$

La resistencia externa para señal de emisor es la combinación en paralelo de R_E y R_L , lo que resulta:

$$r_o = 4,3\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega = 3\text{ k}\Omega$$

Como el transistor tiene una ganancia de corriente alterna de 200, la impedancia de entrada de la base es:

$$Z_{in(\text{base})} = 200(3\text{ k}\Omega + 25\ \Omega) = 605\text{ k}\Omega$$

La impedancia de entrada de la base aparece en paralelo con las dos resistencias de polarización. La impedancia de entrada de la etapa es:

$$Z_{in(\text{etapa})} = 10\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega \parallel 605\text{ k}\Omega = 4,96\text{ k}\Omega$$

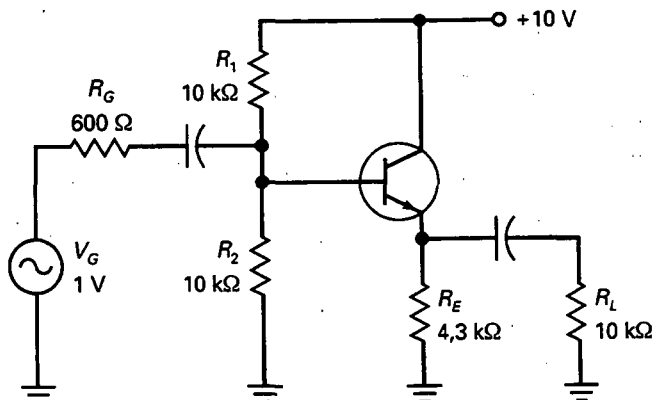


Figura 12-3. Ejemplo.

Como $605\text{ k}\Omega$ es mucho mayor que $5\text{ k}\Omega$, los detectores de averías acostumbran a aproximar la impedancia de entrada de la etapa simplemente como el paralelo de las resistencias de polarización:

$$Z_{in(etapa)} = 10\text{ k}\Omega \parallel 10\text{ k}\Omega = 5\text{ k}\Omega$$

EJEMPLO 12-2

Suponiendo que β vale 200, ¿cuanto vale la tensión alterna de entrada en el seguidor de emisor representado en el circuito de la Figura 12-3?

SOLUCIÓN

En la Figura 12-4 se muestra el circuito equivalente para señal. La tensión alterna de la base aparece en z_{in} . Como la impedancia de entrada de la etapa es grande en comparación con la resistencia del generador, la mayor parte de la tensión del generador aparece en la base. Con el teorema del divisor de tensión:

$$V_{in} = \frac{5\text{ k}\Omega}{5\text{ k}\Omega + 600\text{ }\Omega} 1\text{ V} = 0,893\text{ V}$$

EJEMPLO 12-3

¿Cuál es la ganancia de tensión del seguidor de emisor del circuito de la Figura 12-5? Si $\beta = 150$, ¿cuanto vale la tensión alterna en la carga?

SOLUCIÓN

La tensión continua en la base es la mitad de la tensión de la fuente de alimentación:

$$V_B = 7,5\text{ V}$$

La corriente continua en el emisor es:

$$I_E = \frac{6,8\text{ V}}{2,2\text{ k}\Omega} = 3,09\text{ mA}$$

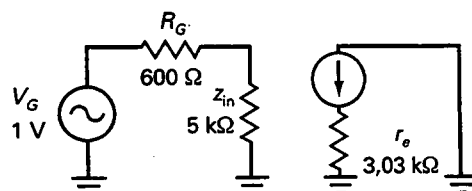


Figura 12-4. Ejemplo.

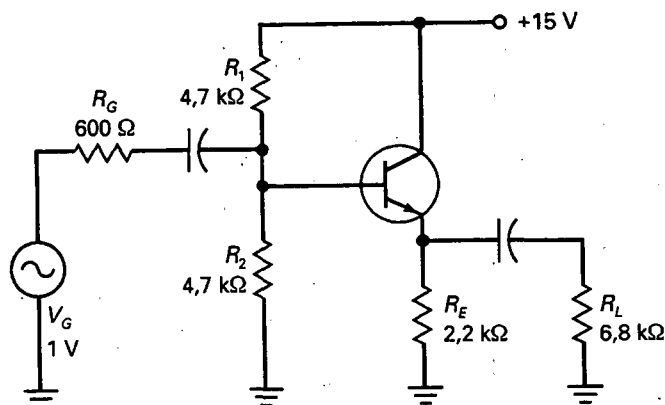


Figura 12-5. Ejemplo.

y la resistencia para señal del diodo emisor es:

$$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{3.09 \text{ mA}} = 8.09 \Omega$$

La resistencia externa para señal de emisor vale:

$$r_o = 2.2 \text{ k}\Omega \parallel 6.8 \text{ k}\Omega = 1.66 \text{ k}\Omega$$

La ganancia de tensión es igual a:

$$A = \frac{1.66 \text{ k}\Omega}{1.66 \text{ k}\Omega + 8.9 \Omega} = 0.995$$

La impedancia de entrada de la base es:

$$Z_{in(base)} = 150(1.66 \text{ k}\Omega + 8.09 \Omega) = 250 \text{ k}\Omega$$

Este valor es mucho mayor que las resistencias de polarización. Por tanto, como muy buena aproximación, la impedancia de entrada del seguidor de emisor es:

$$Z_{in(etapa)} = 4.7 \text{ k}\Omega \parallel 4.7 \text{ k}\Omega = 2.35 \text{ k}\Omega$$

La tensión alterna de entrada toma el siguiente valor:

$$V_{in} = \frac{2.35 \text{ k}\Omega}{600 \Omega + 2.35 \text{ k}\Omega} 1 \text{ V} = 0.797 \text{ V}$$

La tensión alterna de salida toma el siguiente valor:

$$V_{out} = 0.995(0.797 \text{ V}) = 0.793 \text{ V}$$

12-2. Impedancia de salida

La impedancia de salida de un amplificador es la misma que su impedancia Thevenin. Una de las ventajas de un seguidor de emisor es su baja impedancia de salida.

Como se explicó en cursos anteriores de electrónica, la máxima transferencia de potencia se produce cuando la impedancia de la carga está adaptada (igualada) a la impedancia de la fuente (Thevenin). Algunas veces, cuando se desea máxima potencia en la carga, un diseñador puede adaptar la impedancia de carga a la impedancia de salida de un seguidor de emisor. Por ejemplo, la baja impedancia de un altavoz se puede adaptar a la impedancia de salida de un seguidor de emisor para entregar la máxima potencia al altavoz.

□ Idea básica

La Figura 12-6a muestra un generador de alterna excitando un amplificador. Si la fuente no es constante, algo de la tensión alterna pasa a través de la resistencia interna de R_G . En este caso, necesitamos analizar el divisor de tensión mostrado en la Figura 12-6b para obtener la tensión de entrada v_{in} .

Una idea similar se aplica a la salida del amplificador. En la Figura 12-6d podemos aplicar el teorema de Thevenin a los terminales de la carga. Mirando hacia atrás, hacia el amplificador, vemos una impedancia de salida z_{out} . En el circuito equivalente Thevenin, esta impedancia de salida forma un divisor de tensión con resistencia de carga, como se muestra en la Figura 12-6d. Si z_{out} es mucho menor que R_L , la fuente de salida es constante y v_{out} es igual a v_{th} .

□ Amplificadores

La Figura 12-7a muestra el circuito equivalente para señal para la salida de un amplificador EC. Cuando aplicamos el teorema de Thevenin, obtenemos

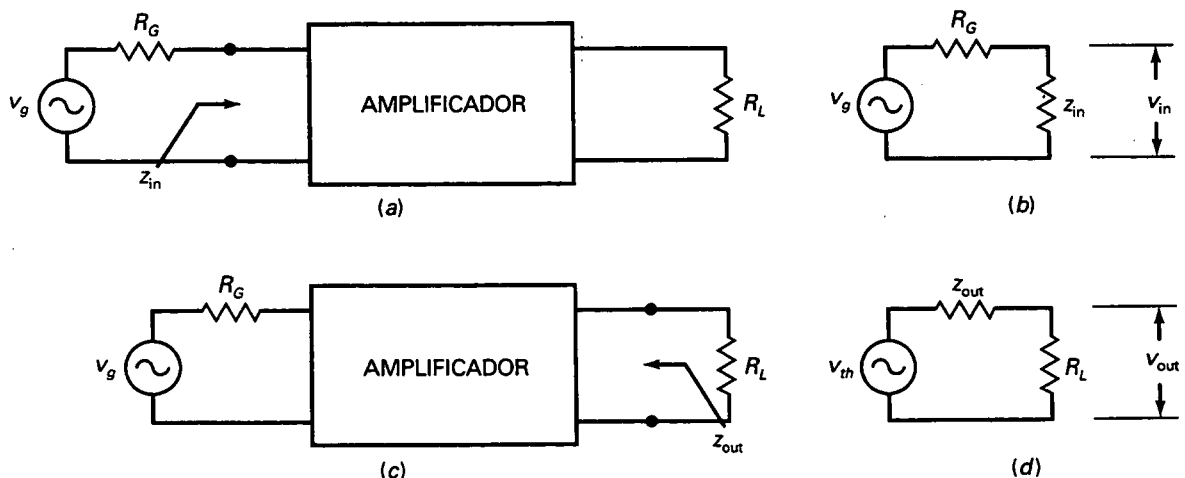


Figura 12-6. Impedancias de entrada y salida.

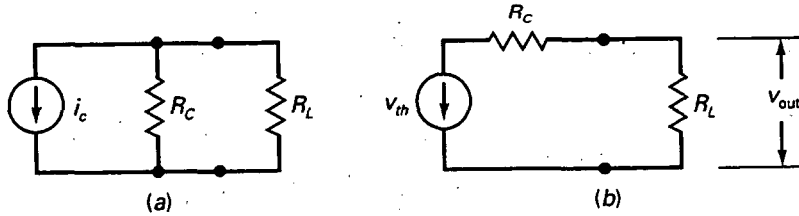


Figura 12-7. Impedancia de salida de la etapa en EC.

la Figura 12-7b. Dicho de otro modo, la impedancia de salida que se ve hacia la resistencia de carga es R_C . Como la ganancia de tensión de un amplificador EC depende de R_C , un diseñador no puede hacer R_C demasiado pequeña sin perder ganancia de tensión. Dicho de otra manera, es muy difícil obtener una impedancia de salida pequeña con un amplificador EC. A causa de esto, los amplificadores EC no son apropiados para excitar resistencias de carga pequeñas.

❑ Seguidor de emisor

La Figura 12-8a muestra el circuito equivalente para señal para un seguidor de emisor. Cuando aplicamos el teorema de Thevenin al punto A obtenemos la Figura 12-8b. La impedancia de salida z_{out} es mucho menor que lo que se puede obtener con un amplificador EC. Es igual a:

$$z_{out} = R_E \parallel \left(r'_e + \frac{R_G \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} \right) \quad (12-5)$$

La impedancia del circuito de base es $R_G \parallel R_1 \parallel R_2$. La ganancia de corriente del transistor reduce esta impedancia por un factor β . El efecto es similar a lo que se obtiene con un amplificador con emisor sin desacoplar, excepto que estamos regresando de la base al emisor. Por tanto, se obtiene una reducción de impedancia en lugar de un incremento. La reducción de impedancia de $(R_G \parallel R_1 \parallel R_2)/\beta$ está en serie con r'_e , como se indica en la Ecuación (12-5).

❑ Funcionamiento ideal

En algunos diseños, las resistencias de polarización y las resistencias para señal del diodo emisor son despreciables. En este caso, la impedancia de salida de un seguidor de emisor se puede aproximar como:

$$z_{out} = \frac{R_G}{\beta} \quad (12-6)$$

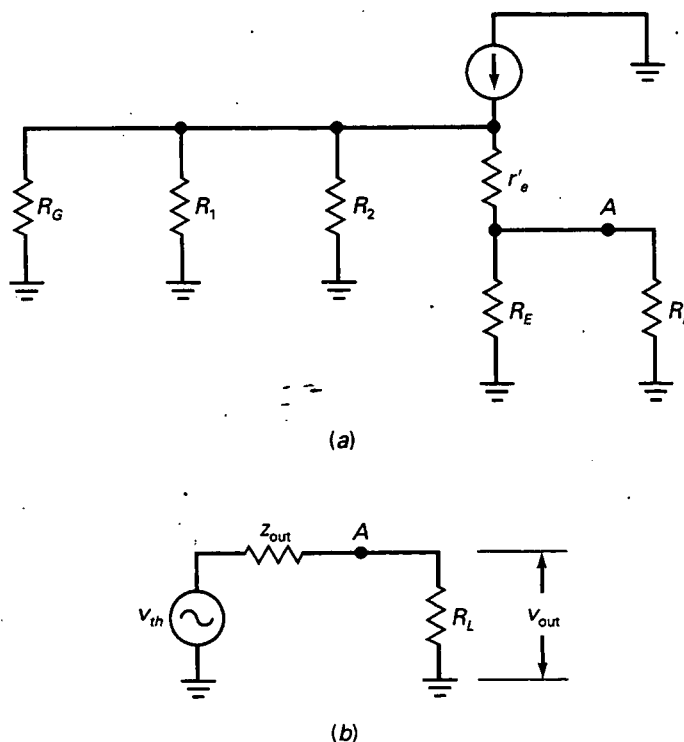


Figura 12-8. Impedancia de salida del seguidor de emisor.

Esto nos devuelve la idea clave de un seguidor de emisor: reduce la impedancia para señal de la fuente de alterna por un factor β . Como resultado, el seguidor de emisor nos permite construir fuentes de alterna constantes. En lugar de usar una fuente de alterna constante que maximice la tensión en la carga, un diseñador puede preferir maximizar la potencia en la carga. En este caso, en lugar de diseñar para

$$z_{out} \ll R_L \text{ (fuente de tensión constante)}$$

el diseñador seleccionará valores para obtener

$$z_{out} = R_L \text{ (máxima transferencia de potencia)}$$

De esta forma, el seguidor de emisor puede entregar la máxima potencia a una impedancia de carga baja, como la de los altavoces estéreo.

La Ecuación (12-6) es una fórmula ideal. Se puede usar para obtener un valor aproximado para la impedancia de salida de un seguidor de emisor. Con circuitos discretos la ecuación normalmente nos da sólo una estimación de la impedancia de salida. Sin embargo es adecuada para detectar averías y en análisis preliminares. Cuando sea necesario se puede usar la Ecuación (12-5) para obtener un valor más preciso de la impedancia de salida.

EJEMPLO 12-4

Estime la impedancia de salida del seguidor de emisor de la Figura 12-9a.

SOLUCIÓN

Idealmente, la impedancia de salida es igual a la resistencia del generador dividida por la ganancia de corriente del transistor:

$$Z_{out} = \frac{600 \, \Omega}{300} = 2 \, \Omega$$

La Figura 12-9b muestra el circuito equivalente de salida. La impedancia de salida es mucho menor que la resistencia de carga, así que la mayoría de la señal aparece a través de la resistencia de carga. Como se puede observar, la fuente de salida de la Figura 12-9b es casi constante porque el cociente de la carga y la resistencia de la fuente es 50.

EJEMPLO 12-5

Calcule la impedancia de salida en la Figura 12-9a usando la Ecuación (12-5).

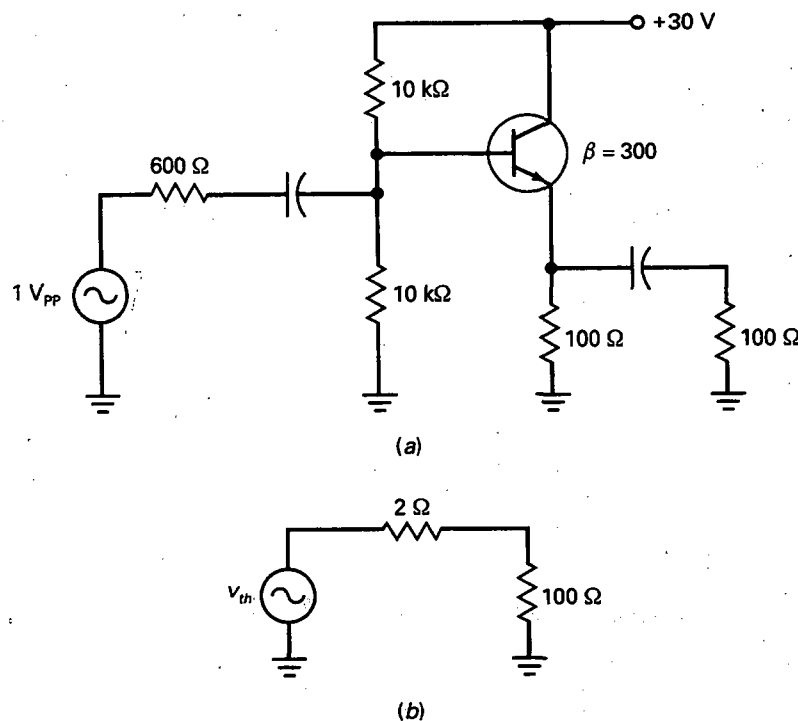


Figura 12-9. Ejemplo.

SOLUCIÓN

La tensión de base en el punto Q es aproximadamente:

$$V_{BQ} = 15 \text{ V}$$

Ignorando V_{BE} , la corriente de emisor en el punto Q es aproximadamente:

$$I_{EQ} = \frac{15 \text{ V}}{100 \Omega} = 150 \text{ mA}$$

La resistencia para señal del diodo emisor es:

$$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{150 \text{ mA}} = 0,167 \Omega$$

La impedancia que se ve hacia atrás desde la base vale:

$$R_G \parallel R_1 \parallel R_2 = 600 \Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega = 536 \Omega$$

La ganancia de corriente reduce esto a:

$$\frac{R_G \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} = \frac{536 \Omega}{300} = 1,78 \Omega$$

que está en serie con r_e , así que la impedancia que se ve mirando hacia el emisor es:

$$r_o = \frac{R_G \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} = 0,167 \Omega + 1,78 \Omega = 1,95 \Omega$$

y está en paralelo con la resistencia de emisor en continua, así que la impedancia de salida es:

$$Z_{out} = R_E \parallel \left(r_o + \frac{R_G \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} \right) = 100 \Omega \parallel 1,95 \Omega = 1,91 \Omega$$

Esta respuesta precisa está extremadamente próxima a la respuesta ideal de 2Ω . Este resultado es típico en muchos diseños. Para detección de averías y análisis preliminares, se puede usar el método ideal para estimar la impedancia de salida.

12-3. MÁXIMA EXCURSIÓN DE SEÑAL

Cuando se usa un seguidor de emisor como amplificador de potencia en la parte final de un sistema, un diseñador normalmente colocará el punto Q en el centro de la recta de carga para señal para obtener la máxima excursión de señal a la salida (MPP: *máximo pico a pico*)

□ Recta de carga para continua

En la Figura 12-10a, los valores grandes de R_2 saturarán el transistor produciendo una corriente de saturación de:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{R_E} \quad (12-7)$$

Pequeños valores de R_2 llevarán al transistor a corte, produciendo una tensión de corte de:

$$V_{CE(\text{corte})} = V_{CC} \quad (12-8)$$

La Figura 12-10b muestra la recta de carga para continua con el punto Q .

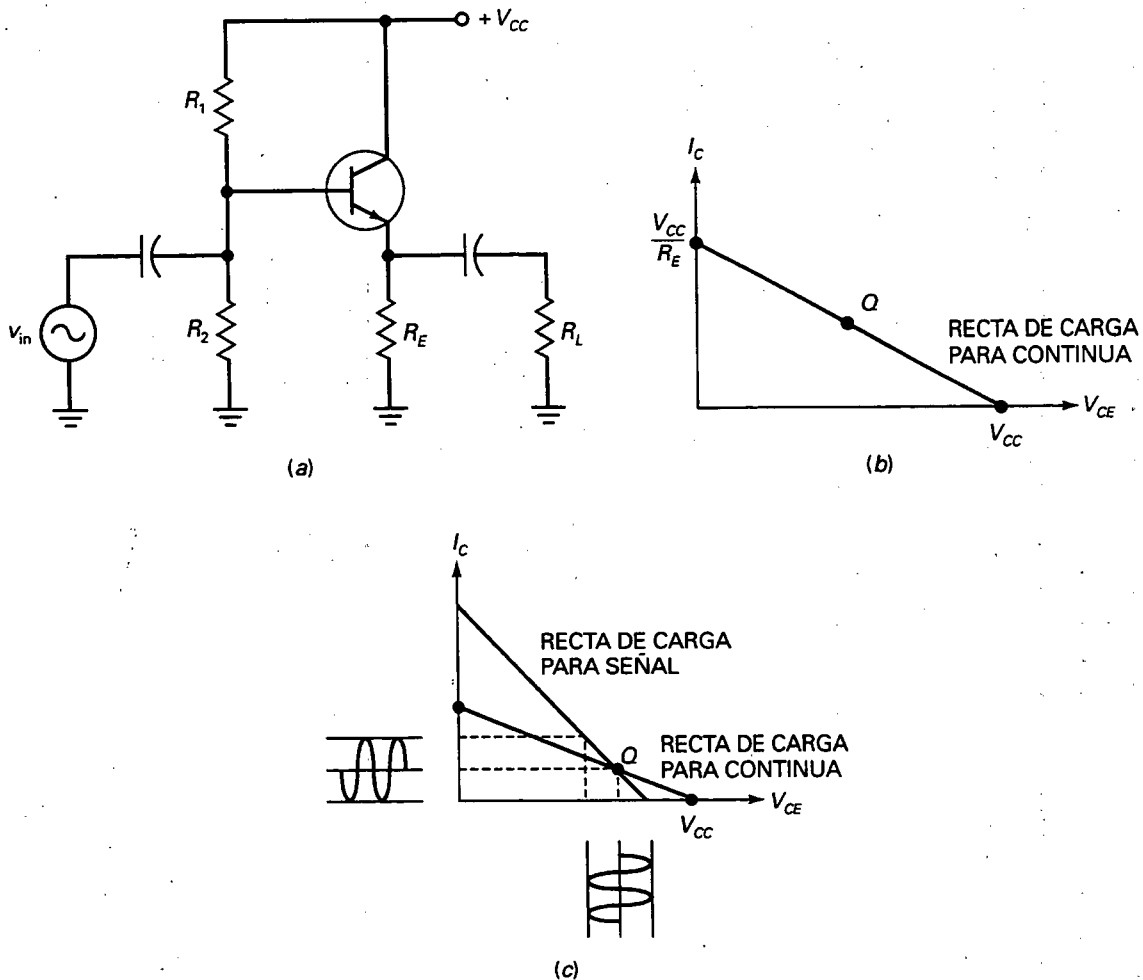


Figura 12-10. Rectas de carga para continua y para señal.

□ Recta de carga para señal

La resistencia de emisor para señal es menor que la resistencia de emisor para continua. Por tanto, cuando una señal alterna entra, el punto instantáneo de operación se mueve a lo largo de la recta de carga para señal en la Figura 12-10c. Como se muestra, la corriente sinusoidal pico a pico y la tensión están determinadas por la recta de carga para señal.

Como la recta de carga para señal tiene una pendiente más acusada que la recta de carga para continua, la máxima excursión de salida es siempre menor que la fuente de tensión. Así se da la siguiente ecuación:

$$\bar{MPP} < V_{CC} \quad (12-9)$$

□ Máxima excursión de señal a la salida

Cuando el punto Q está por debajo del centro de la recta de carga para señal, el pico máximo de la salida (MP) es $I_{CQ}r_e$, como se muestra en la Figura 12-11a. Por otro lado, si el punto Q está por encima del centro de la recta de carga para señal, el pico máximo de la salida es V_{CEQ} , como se muestra en la Figura 12-11b.

Para cualquier punto Q , por tanto, el pico máximo de salida es:

$$MP = I_{CQ}r_e \text{ o } V_{CEQ}, \text{ según cuál sea menor} \quad (12-10)$$

y la máxima excursión de señal a la salida es dos veces esta cantidad:

$$MPP = 2 MP \quad (12-11)$$

Cuando el punto Q está en el centro de la recta de carga para señal:

$$I_{CQ}r_e = V_{CEQ} \quad (12-12)$$

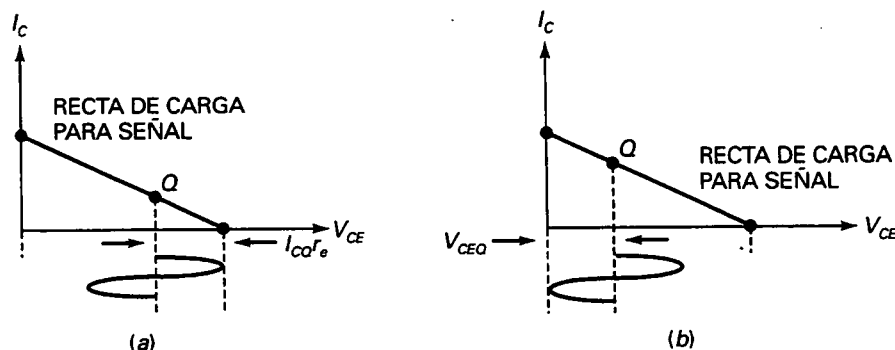


Figura 12-11. Máximas excursiones de pico.

EJEMPLO 12-6

¿Cuáles son los valores de I_{CO} , V_{CEQ} y r_o en la Figura 12-12a?

SOLUCIÓN

$$I_{CO} = \frac{5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{4,3 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = 10 \text{ V} - 4,3 \text{ V} = 5,7 \text{ V}$$

y

$$r_o = 4,3 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega$$

EJEMPLO 12-7

¿Cuál es la máxima excursión de tensión a la salida en la Figura 12-12a?

SOLUCIÓN

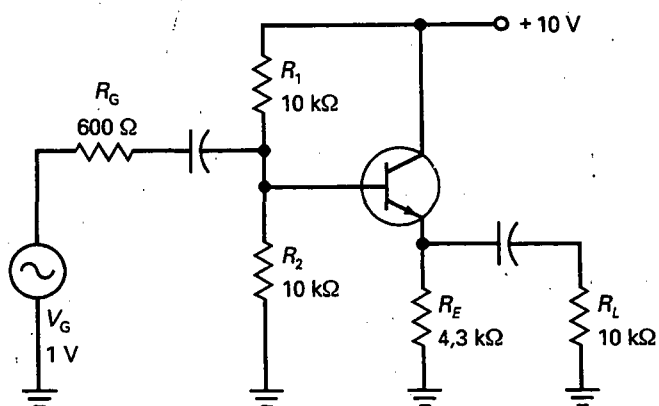
Con una fuente de tensión de 10 V:

$$\text{MPP} < 10 \text{ V}$$

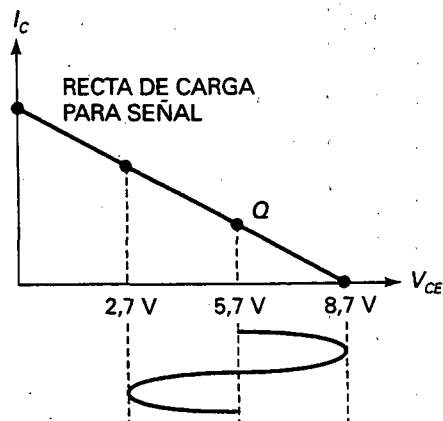
Este es el límite superior de la tensión de salida sin distorsionar del seguidor de emisor. Para calcular el valor de MPP, procedemos de la siguiente manera:

$$I_{CO} r_o = (1 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 3 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = 5,7 \text{ V}$$



(a)



(b)

Figura 12-12. Ejemplo.

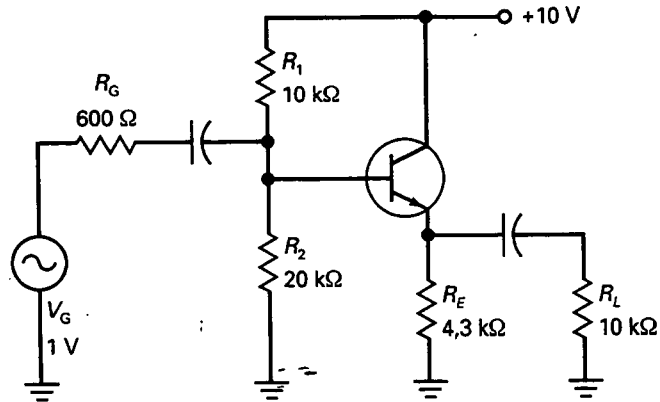


Figura 12-13. Ejemplo.

Como MP es el menor de estos dos, $MP = 3 \text{ V}$ y $MPP = 2 (3 \text{ V}) = 6 \text{ V}$. La Figura 12-12b muestra la recta de carga para señal y la máxima tensión de salida.

EJEMPLO 12-8

¿Cuál es la máxima excursión de tensión a la salida en la Figura 12-13?

SOLUCION

La tensión continua en la base es:

$$V_{BQ} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 20 \text{ k}\Omega} 10 \text{ V} = 6.67 \text{ V}$$

y la tensión continua en el emisor es:

$$V_{EQ} = 6.67 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 5.97 \text{ V}$$

La corriente continua en el colector vale:

$$I_{CQ} = \frac{5.97 \text{ V}}{4.3 \text{ k}\Omega} = 1.39 \text{ mA}$$

La tensión continua colector-emisor es:

$$V_{CEQ} = 10 \text{ V} - 5.97 \text{ V} = 4.03 \text{ V}$$

Ahora, compárese

$$I_{ce} = (1,39 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 4,17 \text{ V}$$

$$V_{ce0} = 4,03 \text{ V}$$

Como MP es el menor de los dos, tenemos que $MP = 4,03 \text{ V}$ y $MPP = 2(4,03 \text{ V}) = 8,06 \text{ V}$.

12-4. CONEXIONES DARLINGTON

Una *conexión Darlington* consiste en dos transistores conectados en cascada cuya ganancia de corriente total es el producto de las ganancias de corriente individuales. Como la ganancia de corriente es mucho mayor, una conexión Darlington puede tener una impedancia de entrada muy alta y puede producir corrientes de salida muy grandes. Las conexiones Darlington se usan con reguladores de tensión y amplificadores de potencia.

□ Par Darlington

La Figura 12-14a muestra un *par Darlington*. Como la corriente de emisor de Q_1 es la corriente de base de Q_2 , el par Darlington tiene una corriente total de:

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \quad (12-13)$$

Por ejemplo, si cada transistor tiene una ganancia de corriente de 200, la ganancia total de corriente es:

$$\beta = (200)(200) = 40.000$$

Los fabricantes de transistores pueden poner un par Darlington dentro de un solo encapsulado, como se ve en la Figura 12-14b. Este dispositivo con

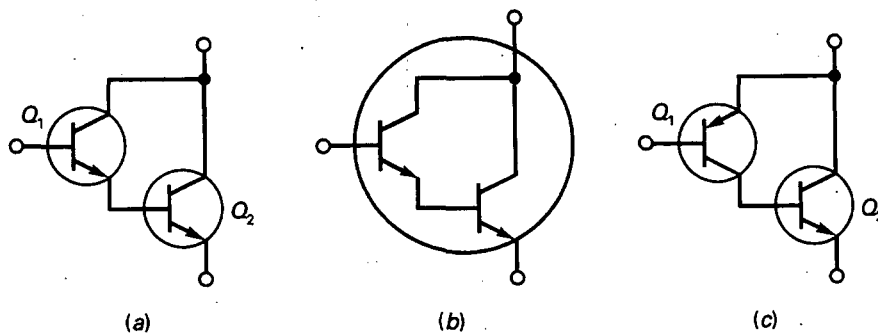


Figura 12-14. a) Par Darlington; b) transistor Darlington; c) Darlington complementario.

tres terminales, conocido como *transistor Darlington*, actúa como si fuese un solo transistor con una ganancia de corriente extremadamente alta. Por ejemplo, el 2N6725 es un transistor Darlington con una ganancia de corriente de 25.000 a 200 mA. Otro ejemplo es el TP102, con una ganancia de corriente de 1.000 a 3 A.

El análisis de un circuito en el que se emplee un transistor Darlington es casi idéntico al proceso discutido anteriormente, excepto por una cosa: como hay dos transistores, hay dos caídas V_{BE} . Por ejemplo, si la tensión continua de base es de 5 V, la tensión continua de emisor es:

$$V_{EQ} = 5 \text{ V} - 2(0,7 \text{ V}) = 3,6 \text{ V}$$

□ Darlington complementario

En la Figura 12-14c se muestra otra conexión Darlington, denominada Darlington complementario, una conexión de transistores *nnp* y *pnp*. La corriente de colector de Q_1 es la corriente de base de Q_2 . Si el transistor *pnp* tiene una ganancia de corriente de β_1 y el transistor *nnp* de salida tiene una ganancia de corriente de β_2 , el Darlington complementario actúa como un transistor único *pnp* con una ganancia de corriente de $\beta_1\beta_2$. El Darlington complementario se usa algunas veces en amplificadores de potencia clase B en contrafase.

EJEMPLO 12-9

Si el par Darlington de la Figura 12-15 tiene una ganancia de corriente total de 10.000, ¿cuál es la impedancia de entrada de la base Q_1 ?

SOLUCIÓN

La resistencia de emisor para señal es:

$$r_e = 60 \, \Omega \parallel 30 \, \Omega = 20 \, \Omega$$

La impedancia de entrada de la base Q_1 vale:

$$Z_{in(base)} = (10.000)(20 \, \Omega) = 200 \, \text{k}\Omega$$

EJEMPLO 12-10

¿Cuál es la máxima excursión de salida en la Figura 12-15?

SOLUCIÓN

La corriente de emisor para continua de Q_1 es:

$$I_{EQ} = \frac{10 \text{ V} - 1,4 \text{ V}}{60 \, \Omega} = 143 \text{ mA}$$

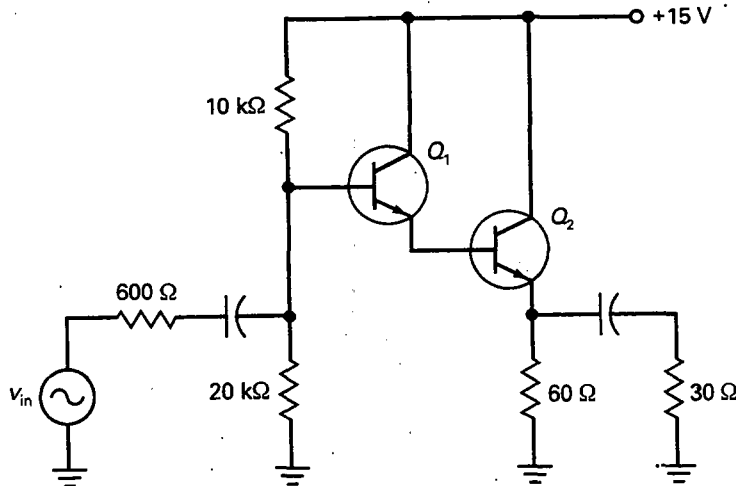


Figura 12-15. Ejemplo.

La tensión colector-emisor en el punto Q vale:

$$V_{CEQ} = 15\text{ V} - 8,6\text{ V} = 6,4\text{ V}$$

Ahora, compare los dos picos:

$$I_{CQ} R_o = (143\text{ mA})(20\text{ }\Omega) = 2,86\text{ V}$$

$$V_{CEQ} = 6,4\text{ V}$$

Por tanto:

$$\text{MPP} = 2(2,86\text{ V}) = 5,72\text{ V}$$

12-5. SEGUIDOR DE EMISOR EN CLASE B EN CONTRAFASE

El funcionamiento en clase B de un transistor conlleva que la corriente de colector circule solamente 180° del ciclo de señal, lo que implica que el punto Q se ubique aproximadamente en el punto de corte de ambas rectas de carga, la de continua y la de señal. Las ventajas que ofrece el funcionamiento en clase B son un menor consumo de corriente y un mayor rendimiento.

□ Circuito en contrafase

En la Figura 12-16a se muestra una forma de conectar un seguidor de emisor en contrafase que funciona en clase B. Se conecta un seguidor de emisor *nnp* y un seguidor de emisor *pnnp* en un circuito en contrafase.

Se puede comenzar su análisis con el circuito equivalente de la Figura 12-16b. El diseñador selecciona las resistencias de polarización de forma que el punto Q se halle en el corte. Así se polariza el diodo emisor de cada transistor entre 0,6 y 0,7 V, de tal forma que está en el límite para empezar a conducir. Idealmente:

$$I_{CQ} = 0$$

Puesto que las resistencias de polarización son iguales, cada diodo emisor está polarizado con la misma tensión. Como resultado se tendrá que la mitad de la tensión de la fuente de alimentación aparecerá entre los terminales colector-emisor de cada transistor. Es decir:

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} \quad (12-14)$$

□ Recta de carga para continua

Al no haber resistencia para continua en los circuitos de colector o de emisor de la Figura 12-16b, la corriente de saturación para continua es infinita. Este hecho significa que la recta de carga para continua es vertical, como se muestra en la Figura 12-17a. Esta situación puede resultar peligrosa, pues la mayor dificultad al diseñar un amplificador de clase B estriba en el hecho de situar de forma estable el punto Q en el punto de corte. Cualquier descenso significativo de V_{BE} con la temperatura puede elevar el punto Q sobre la recta de carga para continua hacia corrientes grandes, con el consiguiente peligro. Por el momento, se asume que el punto Q está fijamente situado en el punto de corte, como se muestra en la Figura 12-17a.

□ Recta de carga para señal

La Figura 12-17a muestra la recta de carga para señal. Cuando alguno de los transistores está conduciendo, el punto de trabajo del transistor que conduce

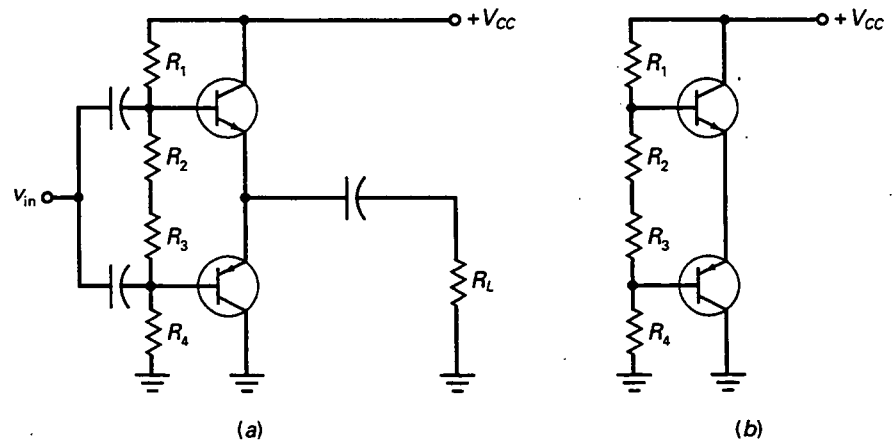


Figura 12-16. Seguidor de emisor clase B en contrafase. a) Circuito completo; b) circuito equivalente para continua.

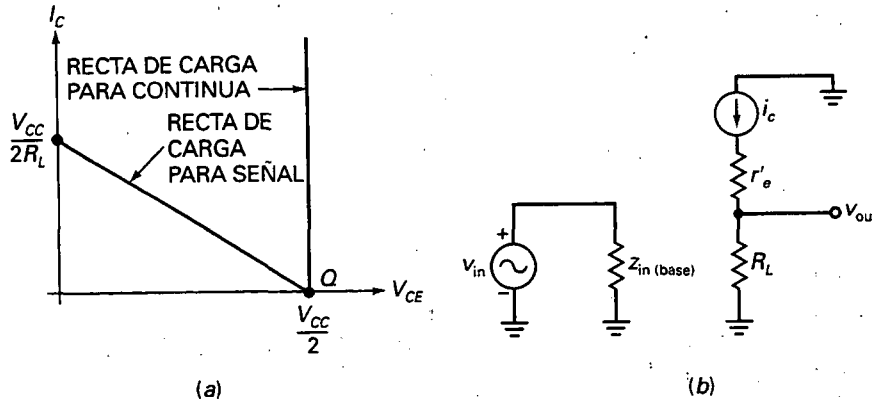


Figura 12-17. a) Rectas de carga para continua y para señal; b) circuito equivalente para señal.

se eleva sobre la recta de carga para señal. El punto de trabajo del otro transistor se mantiene en corte. La variación de tensión del transistor que está conduciendo puede recorrer todo el camino desde corte a saturación. En el siguiente semiciclo el otro transistor actuará de la misma forma, lo que significa que la máxima excursión de señal a la salida es igual a:

$$MPP = V_{CC} \quad (12-15)$$

□ Análisis para señal

La Figura 12-17b muestra el circuito equivalente para señal del transistor en conducción. Dicho circuito es casi idéntico al de un seguidor de emisor en clase A. Ignorando r'_e , la ganancia de tensión es:

$$A \approx 1 \quad (12-16)$$

y la impedancia de entrada de la base es:

$$z_{in(base)} \approx \beta R_L \quad (12-17)$$

□ Acción global del circuito

En el semiciclo positivo de la señal de entrada el transistor de la parte superior de la Figura 12-16a conduce y el de la parte inferior está en corte. El transistor de arriba se comporta como un seguidor de emisor normal, por lo que la tensión de salida es aproximadamente igual a la tensión de entrada.

En el semiciclo negativo de la señal de entrada, el transistor de arriba se pone en corte y el transistor inferior conduce. Este último actúa como un seguidor de emisor normal y produce una tensión en la carga aproximadamente igual a la tensión de entrada.

El transistor de arriba funciona durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada y el transistor de abajo funciona durante el semiciclo negativo. En cada uno de los semiciclos el generador aprecia una gran impedancia de entrada por cualquiera de las bases.

□ Distorsión en el cruce por cero (*crossover*)

En la Figura 12-18a se muestra el circuito equivalente para señal del seguidor de emisor clase B en contrafase. Suponga que no se aplica polarización a los diodos de emisor. Entonces, la tensión alterna de entrada tiene que crecer por encima de 0,7 V para superar la barrera de potencial de los diodos de emisor. Por esta razón no circulará corriente por Q_1 cuando la señal es menor de 0,7 V.

Sucede lo mismo en el otro semiciclo; no circula corriente por Q_2 hasta que la tensión alterna de entrada tiene un valor negativo menor de 0,7 V. Este hecho lleva a que si no se aplica polarización a los diodos de emisor, la salida de un seguidor de emisor clase B en contrafase sea la que se indica en la Figura 12-18b.

La señal está distorsionada a causa del recorte entre los semiciclos y la salida es menor que la señal sinusoidal. Como los recortes tienen lugar entre el tiempo en que un transistor se corta y el tiempo en que el otro comienza a conducir, a esta distorsión se le denomina *distorsión en el cruce por cero*.

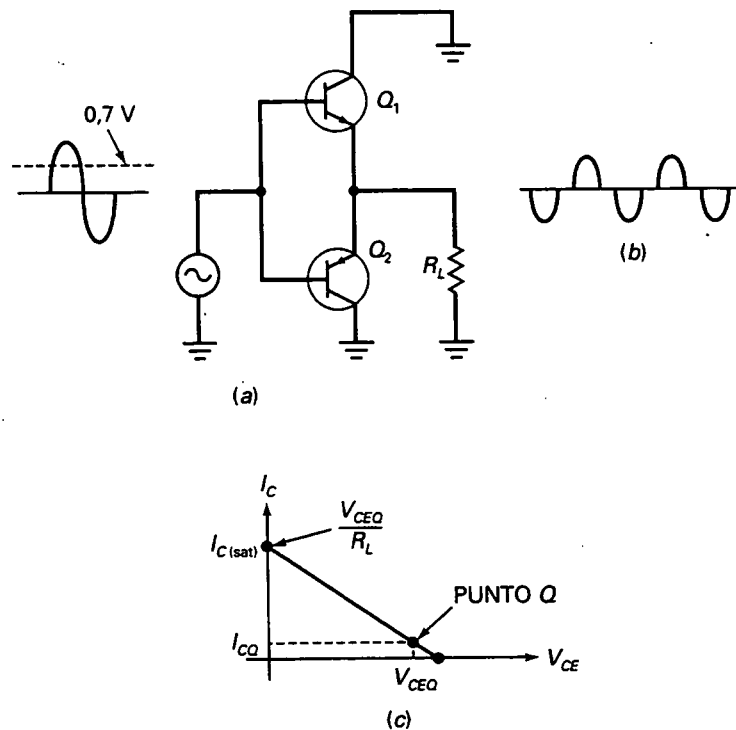


Figura 12-18. a) Circuito equivalente para señal; b) distorsión en el cruce por cero; c) el punto Q está ligeramente por encima del corte.

(*crossover*). Para eliminarla es necesario aplicar una ligera polarización directa a cada diodo emisor. Este hecho significa situar el punto Q ligeramente por encima del corte, como se muestra en la Figura 12-18c. Como guía se puede indicar que una I_{CQ} del orden del 1 al 5 por 100 de $I_{C(sat)}$ es suficiente para eliminar la distorsión en el cruce por cero.

□ Clase AB

En la Figura 12-18c, la ligera polarización directa implica que el ángulo de conducción será algo superior a 180° , por lo que el transistor conducirá durante un poco más que la mitad de un ciclo. Estrictamente hablando, ya no tenemos funcionamiento en clase B. A causa de esto, el funcionamiento se denomina a veces como clase AB y se define por un ángulo de conducción entre 180° y 300° . Pero apenas es clase AB. Por esta razón, la mayoría de la gente todavía se refiere a este circuito como amplificador en clase B en contrafase porque el funcionamiento es muy cercano a clase B.

□ Fórmulas de potencia

Las siguientes fórmulas se aplican a todas las clases de funcionamiento, incluyendo clase B en contrafase:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (\text{Ganancia de potencia})$$

$$P_{out} = \frac{v_{out}^2}{8R_L} \quad (\text{Potencia de salida para señal})$$

$$P_{out(max)} = \frac{MPP^2}{8R_L} \quad (\text{Máxima potencia de salida para señal})$$

$$P_{dc} = V_{CC}I_{dc} \quad (\text{Potencia de entrada en continua})$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100 \% \quad (\text{Rendimiento})$$

Cuando se usan estas fórmulas para analizar un seguidor de emisor clase B en contrafase, se debe recordar que el amplificador en clase B en contrafase tiene la recta de carga para señal y las formas de onda de la Figura 12-19a. Cada transistor proporciona la mitad de un ciclo.

□ Disipación de potencia del transistor

De forma ideal, la disipación de potencia del transistor es cero cuando no hay señal a la entrada porque ambos transistores están en corte. Si hay una ligera polarización directa para evitar la distorsión en el cruce por cero, existe una pequeña disipación de potencia en cada transistor.

Cuando existe una señal de entrada, la disipación de potencia del transistor alcanza un nivel significativo. La disipación de potencia del transistor depende del tramo de recta de carga para señal que se utilice. La máxima

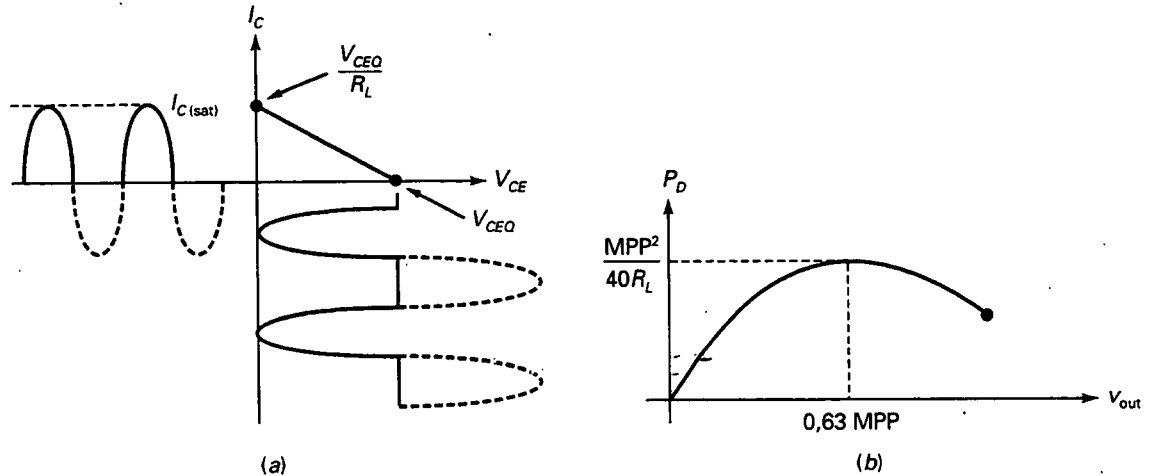


Figura 12-19. a) Recta de carga para clase B; b) disipación de potencia del transistor.

disipación de potencia de cada transistor es:

$$P_{D(max)} = \frac{MPP^2}{40R_L} \quad (12-18)$$

La Figura 12-19b muestra cómo varía la disipación de potencia del transistor con la tensión pico a pico en la carga. Como se puede observar, P_D alcanza un máximo cuando la tensión pico a pico en la carga es el 63 por 100 de MPP. Como esto es el peor caso, cada transistor en un amplificador en clase B en contrafase debe tener una limitación de potencia de al menos $MPP^2/40R_L$.

EJEMPLO 12-11

La resistencia variable de la Figura 12-20 coloca a ambos diodos de emisor en el límite para la conducción. ¿Cuál es la máxima disipación de potencia del transistor? ¿Y la máxima potencia de salida?

SOLUCIÓN

La máxima excursión de señal de salida es:

$$MPP = V_{CC} = 20 \text{ V}$$

Con la Ecuación (12-18):

$$P_{D(max)} = \frac{MPP^2}{40R_L} = \frac{(20 \text{ V})^2}{40(8 \Omega)} = 1,25 \text{ W}$$

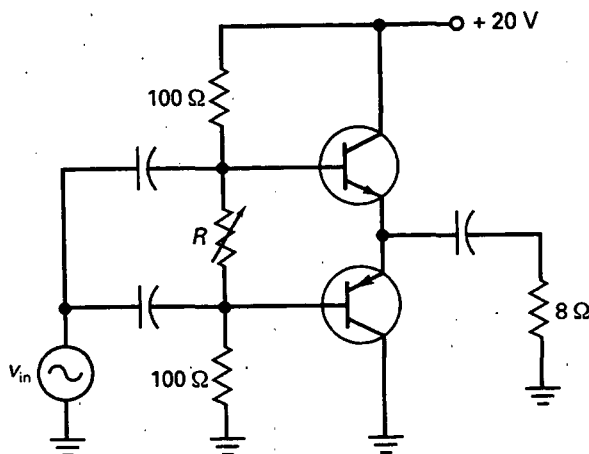


Figura 12-20. Ejemplo.

La máxima potencia de salida vale:

$$P_{out(max)} = \frac{MPP^2}{8RL} = \frac{(20V)^2}{8(8\Omega)} = 6,25W$$

EJEMPLO 12-12

Si la resistencia variable es de 15Ω , ¿cuál es el rendimiento en el ejemplo anterior?

SOLUCIÓN

La corriente continua a través de las resistencias de polarización ofrece el siguiente resultado:

$$I_{polarización} \approx \frac{20V}{215k\Omega} = 0,093A$$

A continuación, necesitamos calcular la corriente continua a través del transistor superior. Esta es la forma de hacerlo como se muestra en la Figura 12-19a; la corriente de saturación vale

$$I_{Q(sat)} = \frac{V_{CEQ}}{R_L} = \frac{10V}{8\Omega} = 1,25A$$

La corriente de colector del transistor que conduce es una señal de media onda con un pico de $I_{C(sat)}$. Por tanto, tiene un valor medio de:

$$I_{av} = \frac{I_{C(sat)}}{\pi} = \frac{1,25 \text{ A}}{\pi} = 0,398 \text{ A}$$

La corriente consumida total es:

$$I_{dc} = 0,093 \text{ A} + 0,398 \text{ A} = 0,491 \text{ A}$$

La potencia continua de entrada es:

$$P_{dc} = (20 \text{ V})(0,491 \text{ A}) = 9,82 \text{ W}$$

El rendimiento de la etapa es:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100\% = \frac{6,25 \text{ W}}{9,82 \text{ W}} \times 100\% = 63,6\%$$

12-6. POLARIZACIÓN DE AMPLIFICADORES CLASE B

Como se mencionó anteriormente, la tarea más difícil al diseñar amplificadores en clase B es situar el punto Q estable cerca del punto de corte. En esta sección se discute el problema y su solución.

□ Polarización por medio de un divisor de tensión

En la Figura 12-21 se muestra una polarización por medio de un divisor de tensión para un circuito clase B en contrafase. Los dos transistores tienen que ser complementarios; es decir, sus curvas V_{BE} , sus especificaciones máximas, etc., deben ser similares. Por ejemplo, el 2N3904 y el 2N3906 son complementarios, siendo el primero un transistor *nnp* y el segundo un *pnnp*. Se dispone de pares complementarios como éste para cualquier diseño de amplificadores clase B en contrafase.

Para evitar la distorsión en el cruce por cero en la Figura 12-21, el punto Q se ubica ligeramente por encima del corte, con el valor correcto de V_{BE} localizado en algún punto entre 0,6 y 0,7. Aquí surge el mayor problema: la corriente de colector es muy sensible a los cambios en V_{BE} . Las hojas de características indican que un incremento de 60 mV en V_{BE} multiplica por 10 la corriente de emisor. Por tal motivo, casi siempre se utiliza una resistencia ajustable para fijar el punto Q en su valor correcto.

No obstante, una resistencia ajustable no resuelve el problema de la temperatura. Aunque el punto Q puede ser perfecto a temperatura ambiente, éste variará cuando la temperatura cambie. Como ya se discutió anteriormente, V_{BE} disminuye aproximadamente 2 mV por cada grado que aumente la temperatura. Cuando la temperatura aumenta en el circuito de la Figura 12-21,

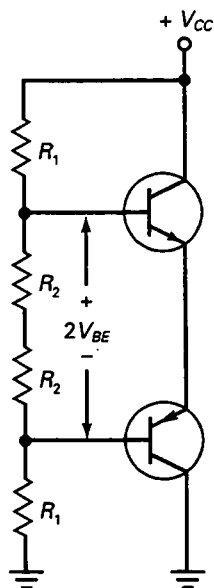


Figura 12-21. Amplificador en clase B en contrafase polarizado por un divisor de tensión.

la tensión fija en cada diodo emisor obliga a un aumento rápido en la corriente de colector. Si la temperatura aumenta 30° , la corriente de colector crece en un factor de 10, ya que la tensión que fija la polarización se mantiene constante. Por tanto, el punto Q es muy inestable con una polarización por división de tensión.

El último peligro en el circuito de la Figura 12-21 es el *escape térmico*. Cuando la temperatura aumenta, la corriente de colector aumenta. Al aumentar la corriente de colector, la temperatura de la unión también aumenta, reduciéndose más el valor real de V_{BE} . Esta situación de escalada significa que la corriente de colector puede «escaparse», elevándose hasta que una potencia excesiva destruya el transistor.

Que el escape tenga lugar o no depende de las propiedades térmicas del transistor, de cómo se enfríe y del tipo de disipador de calor empleado. Con bastante frecuencia, la polarización por divisor de tensión utilizada en el circuito de la Figura 12-21 producirá escape térmico, que destruirá los transistores.

□ Polarización con diodos

Una manera de evitar el escape térmico es la polarización con diodos, como se ve en la Figura 12-22. La idea es usar *diodos de compensación* que proporcionen la tensión de polarización a los diodos de los emisores. Para que funcione este circuito, las curvas de los diodos deben coincidir con las curvas V_{BE} de los transistores. Así, cualquier aumento en la temperatura reducirá la tensión de polarización desarrollada por los diodos de compensación exactamente en la cantidad adecuada.

Supóngase, por ejemplo, que una tensión de polarización de 0,65 V fija una corriente de colector de 2 mA. Si la temperatura se eleva 30°C , entonces la tensión en cada diodo disminuye aproximadamente 60 mV. Como el valor de V_{BE} requerido también disminuye aproximadamente en 60 mV, la corriente de colector se mantiene aproximadamente en 2 mA.

Para que la polarización con diodos permanezca invariable frente a los cambios de temperatura, las curvas de los diodos deben ser muy similares a las curvas V_{BE} en un amplio rango de temperatura. Esta situación no es fácil de conseguir con circuitos discretos debido a la tolerancia de los componentes. Sin embargo, la polarización con diodos es fácil de implementar con circuitos integrados, ya que los diodos y los transistores están en el mismo chip, lo cual significa que tienen curvas casi idénticas.

Con la polarización con diodos, la corriente de colector es igual a la corriente por los diodos de compensación de la Figura 12-22, dada por

$$I_{\text{polarización}} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{2R} \quad (12-19)$$

Cuando los diodos de compensación igualan las curvas de V_{BE} de los transistores, I_{CQ} tiene el mismo valor que $I_{\text{polarización}}$. (Para más detalles diríjase a la Sec. 17-7.) Como se mencionó anteriormente, I_{CQ} debería estar entre el 1 y 5 por 100 de $I_{C(\text{sat})}$ para evitar la distorsión en el cruce por cero.

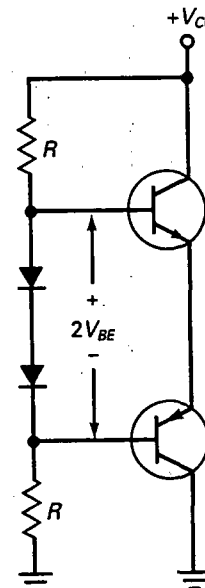


Figura 12-22. Amplificador en clase B en contrafase polarizado por diodos.

EJEMPLO 12-13

¿Cuál es la corriente de colector en el punto Q en la Figura 12-23?
 ¿Y el máximo rendimiento del amplificador?

SOLUCIÓN

La corriente de polarización a través de los diodos de compensación es:

$$I_{\text{polarización}} = \frac{20 \text{ V} - 1,4 \text{ V}}{2(3,9 \text{ k}\Omega)} = 2,38 \text{ mA}$$

Este es el valor de la corriente de colector en el punto Q, suponiendo que los diodos de compensación se adaptan a los diodos de emisor.

La corriente de saturación de colector es:

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CEQ}}{R_L} = \frac{10 \text{ V}}{10 \Omega} = 1 \text{ A}$$

El valor medio de la corriente de colector de media onda:

$$I_{av} = \frac{I_{C(\text{sat})}}{\pi} = \frac{1 \text{ A}}{\pi} = 0,318 \text{ A}$$

La corriente total consumida vale:

$$I_{dc} = 2,38 \text{ mA} + 0,318 \text{ A} = 0,32 \text{ A}$$

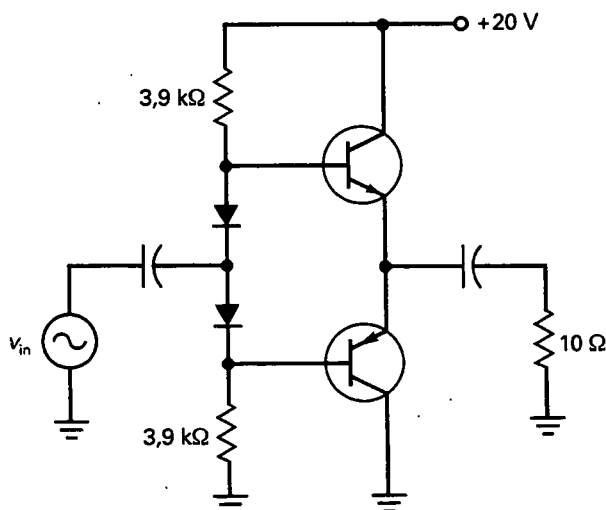


Figura 12-23. Ejemplo.

La potencia de entrada en continua es:

$$P_{dc} = (20 \text{ V})(0,32 \text{ A}) = 6,4 \text{ W}$$

La máxima potencia de salida alterna vale:

$$P_{out(max)} = \frac{MPP^2}{8R_L} = \frac{(20 \text{ V})^2}{8(10 \Omega)} = 5 \text{ W}$$

El rendimiento de la etapa tiene el siguiente resultado:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100\% = \frac{5 \text{ W}}{6,4 \text{ W}} \times 100\% = 78,1\%$$

12-7. EXCITACIÓN PARA UN AMPLIFICADOR EN CLASE B

En el análisis inicial del seguidor de emisor clase B en contrafase se emplearon condensadores para acoplar la señal alterna al amplificador. Ésta no es la mejor forma de excitar un amplificador en clase B.

□ Excitación en EC

La etapa que precede a la de salida se denomina *excitadora*. En vez de acoplar capacitivamente en la etapa de salida en contrafase, podemos utilizar una etapa en EC acoplada directamente, como se muestra en la Figura 12-24a. El transistor Q_2 es una fuente de corriente que establece una corriente continua de polarización por los diodos. Ajustando R_2 , se puede controlar la corriente continua de emisor por R_4 , hecho que significa que Q_2 fija la corriente por los diodos de compensación.

Cuando una señal alterna se conecta a la base de Q_1 actúa como un amplificador con resistencia de emisor sin desacoplar. La señal alterna amplificada e invertida en el colector de Q_1 excita las bases de Q_2 y Q_3 . En el semiciclo positivo, Q_2 conduce y Q_3 está cortado. En el semiciclo negativo, Q_2 está cortado y Q_3 conduce. Como el condensador de acopio de salida es un cortocircuito para alterna, la señal alterna pasa a la resistencia de carga.

La Figura 12-24b muestra el circuito equivalente para señal de la etapa en EC. Los diodos se han sustituido por sus resistencias para señal. En cualquier circuito práctico, r'_e es al menos 100 veces menor que R_3 ; por tanto, el circuito equivalente para señal se puede simplificar al de la Figura 12-24c.

Ahora, se puede observar que la etapa excitadora es un amplificador con resistencia de emisor sin desacoplar cuya salida amplificada e invertida excita ambas bases de los transistores de salida con la misma señal. Generalmente, la impedancia de entrada de los transistores de salida es

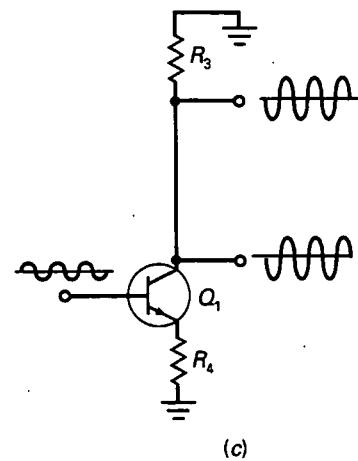
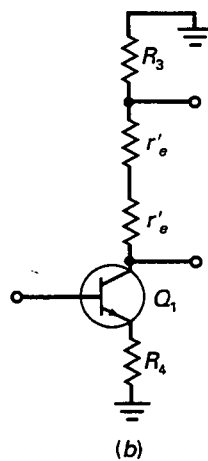
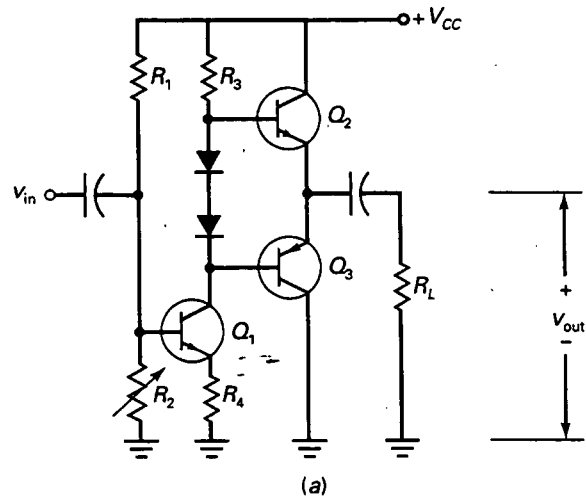


Figura 12-24. a) Excitación en EC acoplada directamente; b) circuito equivalente para continua; c) circuito equivalente para señal simplificado.

muy alta, por lo que la ganancia de tensión de la etapa excitadora se puede aproximar por:

$$A = \frac{R_3}{R_4}$$

En resumen, la etapa excitadora es un amplificador con resistencia de emisor sin desacoplar que produce una gran señal para el amplificador en contrafase de salida.

❑ Realimentación negativa en dos etapas

La Figura 12-25 es otro ejemplo del uso de una etapa en EC para excitar un seguidor de emisor clase B en contrafase. La señal de entrada es amplificada

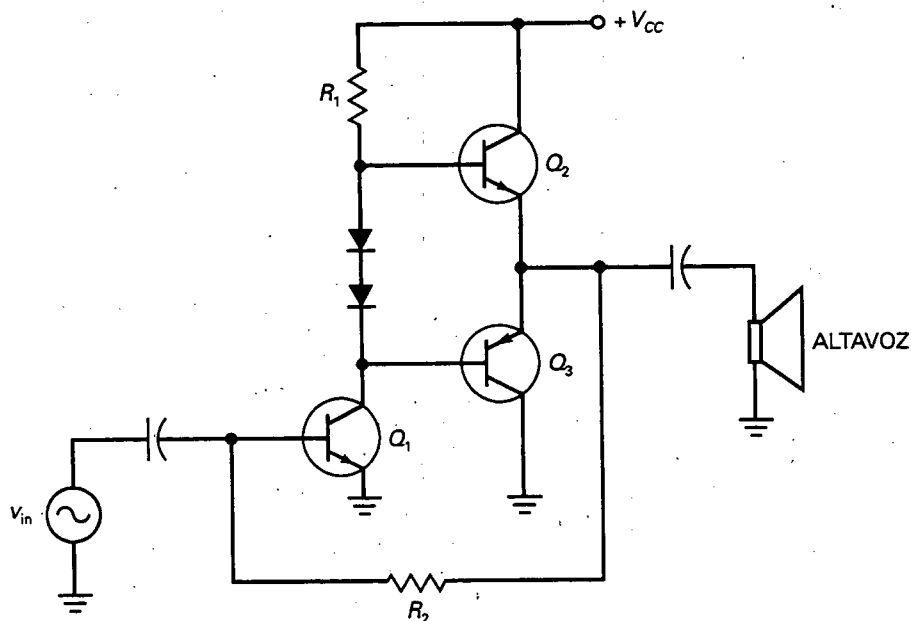


Figura 12-25. Realimentación negativa en dos etapas a una entrada en EC.

e invertida por el transistor Q_1 . Después, la etapa en contrafase proporciona la ganancia de corriente que se necesita para excitar la baja impedancia del altavoz. Nótese que el excitador CE tiene su emisor conectado a masa. Como resultado, esta etapa tiene más ganancia de tensión que la correspondiente de la figura 12-24a.

La resistencia R_2 hace dos cosas útiles: primero, como está conectada a una tensión continua de $+V_{CC}/2$, esta resistencia proporciona la polarización continua para Q_1 ; segundo, R_2 produce una realimentación negativa para la señal de alterna. Veamos por qué: una señal positiva en la base de Q_1 produce una señal negativa en el colector de Q_1 y, por tanto, la salida del seguidor de emisor es negativa. Cuando se realimenta la base de Q_1 a través de R_2 , esta señal de retorno se opone a la señal original de entrada. Esto es la realimentación negativa, que estabiliza la polarización y la ganancia de tensión de todo el amplificador.

12-8. REGULACIÓN DE TENSIÓN MEJORADA

Además de emplearse en amplificadores clase B en contrafase, un seguidor de emisor se utiliza mucho en reguladores zener. En conjunción con un diodo zener, el seguidor de emisor puede producir tensiones de salida reguladas con corrientes de salida mucho mayores.

□ Seguidor con zener

En la Figura 12-26a se muestra un *seguidor con un zener*, un circuito en que se combinan un regulador zener y un seguidor de emisor. El funcionamiento

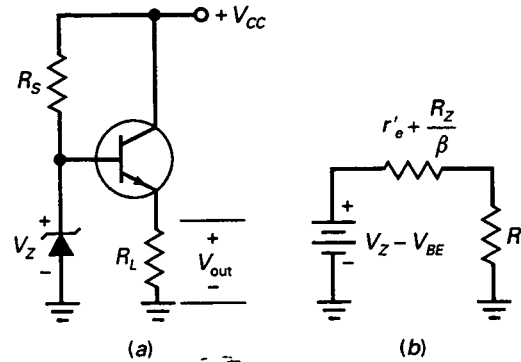


Figura 12-26. a) Seguidor zener; b) circuito equivalente para señal.

es el siguiente: la tensión zener es la entrada a la base del seguidor de emisor; por tanto, la tensión continua de salida es:

$$V_{out} = V_Z - V_{BE} \quad (12-20)$$

Esta tensión de salida es fija e igual a la tensión zener menos la caída V_{BE} del transistor. Si la tensión de la fuente cambia, la tensión zener se mantiene aproximadamente constante, y lo mismo ocurre con la tensión de salida. Es decir, el circuito se comporta como un regulador de tensión porque la tensión de salida es siempre una caída V_{BE} menor que la tensión zener.

El seguidor con zener tiene dos ventajas con respecto a un regulador zener ordinario; en primer lugar, el diodo zener de la Figura 12-26a tiene que producir una corriente en la carga de

$$I_B = \frac{I_{out}}{\beta_{dc}} \quad (12-21)$$

Como esta corriente de base es mucho menor que la corriente de salida, podemos usar un diodo zener mucho más pequeño.

Por ejemplo, si se desea proporcionar una corriente del orden de amperios a una resistencia de carga, un regulador zener normal requerirá un diodo zener que pueda manejar varios amperios. Sin embargo, con el regulador mejorado de la Figura 12-26a sólo se requerirá que el diodo zener maneje decenas de amperios.

La segunda ventaja de un seguidor con zener es su baja impedancia de salida. En un regulador zener normal, la resistencia de carga percibe una impedancia de salida aproximadamente igual a R_Z , la impedancia zener. Pero en el seguidor con zener, la impedancia de salida es:

$$z_{out} = r'_e + \frac{R_Z}{\beta_{dc}} \quad (12-22)$$

La Figura 12-26b muestra el circuito equivalente de salida. Como z_{out} normalmente es muy pequeña comparada con R_L , un seguidor de emisor puede mantener casi constante la tensión continua en la carga porque es como si la fuente fuese constante.

En resumen, el seguidor con zener proporciona la regulación de un diodo zener con la capacidad añadida de manejo de corriente de un seguidor de emisor.

□ Regulador con dos transistores

La Figura 12-27 muestra otro regulador de tensión. La tensión continua de entrada V_{in} proviene de una fuente de alimentación no regulada, tal como un puente rectificador con filtro con condensador a la entrada. Típicamente, V_{in} tiene un rizado pico a pico de más o menos el 10 por 100 de la tensión continua. La tensión de salida final V_{out} casi no tiene rizado y su valor es prácticamente constante, incluso aunque la tensión de entrada y la corriente de la carga puedan variar en un gran rango.

¿Cómo funciona? Cualquier intento de cambio en la tensión de salida produce una tensión de alimentación amplificada que se opone al cambio original. Por ejemplo, supóngase que la tensión de salida se incrementa. Entonces, la tensión que aparece en la base de Q_1 se incrementa. Como Q_1 y Q_2 forman un amplificador en EC, la tensión de colector de Q_1 se reducirá a causa de la ganancia de tensión.

Como la tensión de colector de Q_1 se ha reducido, la tensión de la base de Q_2 se reduce. Como Q_2 es un seguidor de emisor, la tensión de salida se reducirá. En otras palabras, tenemos realimentación negativa. El incremento original en la tensión de salida produce un decremento opuesto en la tensión de salida. El efecto global es que la tensión de salida se incrementa sólo ligeramente, mucho menos de lo que lo haría sin la realimentación negativa.

De la misma manera, si la tensión de salida trata de reducirse, aparece menos tensión en la base de Q_1 , aparece más tensión en el colector de Q_1 y aparece más tensión en el emisor de Q_2 .

De nuevo tenemos una tensión de retorno que se opone al cambio original en la tensión de salida. Por tanto, la tensión de salida decrecerá sólo un poco, mucho menos de lo que lo haría sin la realimentación negativa.

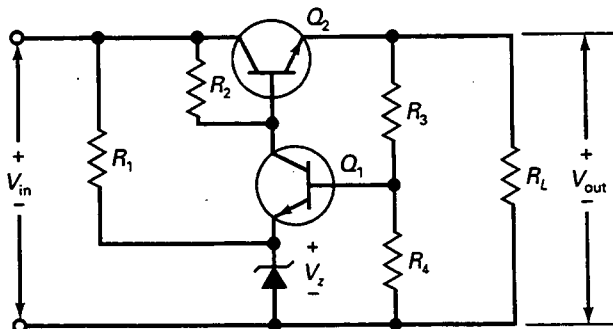


Figura 12-27. Transistor regulador de tensión.

440 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

A causa del diodo zener, la tensión del emisor de Q_1 es igual a V_Z . La tensión de la base de Q_1 es una caída V_{BE} mayor. Por tanto, la tensión a través de R_4 es:

$$V_4 = V_Z + V_{BE}$$

Con la ley de Ohm, la corriente a través de R_4 es:

$$I_4 = \frac{V_Z + V_{BE}}{R_4}$$

Como la corriente circula a través de R_3 en serie con R_4 , la tensión de salida es:

$$V_{out} = I_4(R_3 + R_4)$$

Después de expandir, se obtiene la siguiente expresión:

$$V_{out} = \frac{R_3 + R_4}{R_4}(V_Z + V_{BE}) \quad (12-23)$$

EJEMPLO 12-14

En la Figura 12-28 se muestra el regulador zener como se dibuja habitualmente en los esquemas. ¿Cuál es la tensión de salida? Si $\beta_{DC} = 80$, ¿cuanto vale la corriente que circula por el diodo zener?

SOLUCION

La tensión de salida es aproximadamente:

$$V_{out} = 10 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 9.3 \text{ V}$$

Con una resistencia de carga de 15Ω , la corriente en la carga es:

$$I_{out} = \frac{9.3 \text{ V}}{15 \Omega} = 0.62 \text{ A}$$

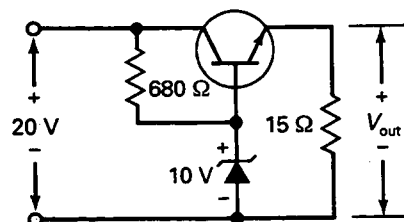


Figura 12-28. Ejemplo.

La corriente por la base es:

$$I_B = \frac{0,62 \text{ A}}{100} = 6,2 \text{ mA}$$

La corriente por la resistencia en serie es:

$$I_S = \frac{20 \text{ V} - 10 \text{ V}}{680 \Omega} = 14,7 \text{ mA}$$

La corriente zener es:

$$I_Z = 14,7 \text{ mA} - 6,2 \text{ mA} = 8,5 \text{ mA}$$

EJEMPLO 12-15

¿Cuál es la tensión de salida en la Figura 12-29?

SOLUCIÓN

Con la Ecuación (12-23):

$$V_{\text{out}} = \frac{2 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} (6,2 \text{ V} + 0,7 \text{ V}) = 20,7 \text{ V}$$

También se puede resolver el problema de la siguiente forma:
La corriente a través de la resistencia de $1 \text{ k}\Omega$ es:

$$I_1 = \frac{6,2 \text{ V} + 0,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 6,9 \text{ mA}$$

La corriente circula a través de una resistencia total de $3 \text{ k}\Omega$, lo que significa que la tensión de salida vale:

$$V_{\text{out}} = (6,9 \text{ mA})(3 \text{ k}\Omega) = 20,7 \text{ V}$$

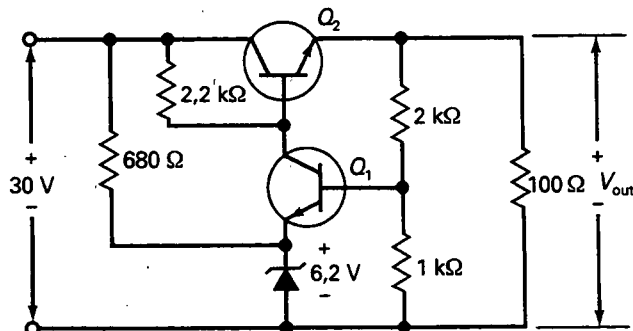


Figura 12-29. Ejemplo.

RESUMEN

Sección 12-1. Amplificador en CC

Un amplificador CC, mejor conocido como un seguidor de emisor, tiene su colector como una masa de alterna. La señal de entrada excita la base y la señal de salida viene del emisor. Como está fuertemente estabilizado, un seguidor de emisor tiene una ganancia de tensión estable, una impedancia de entrada alta y una baja distorsión.

Sección 12-2. Impedancia de salida

La impedancia de salida de un amplificador es la misma que su impedancia de Thevenin. Un seguidor de emisor tiene una impedancia de salida baja. La ganancia de corriente de un transistor transforma la impedancia de la fuente que excita la base a un valor mucho más bajo cuando se ve desde el emisor.

Sección 12-3. Máxima excursión de salida

La tensión de alimentación V_{CC} es el límite absoluto en la tensión de salida pico a pico. La tensión de pico es la más pequeña de entre el $I_{CQ}r_e$ o V_{CEQ} . La máxima excursión de salida es dos veces el pico de salida.

Sección 12-4. Conexiones Darlington

Dos transistores se pueden conectar como un par Darlington. El emisor del primero se conecta a la base del segundo. Esta conexión produce una ganancia de corriente igual al producto de las ganancias de corriente individuales.

Sección 12-5. Seguidor de emisor en clase B en contrafase

El funcionamiento en clase B proporciona un mayor rendimiento que el funcionamiento en clase A. En el seguidor de emisor clase B en contrafase se emplean transistores *npn* y *pnp* complementarios. El transistor *npn* conduce durante un semiciclo, mientras el transistor *pnp* conduce durante el otro semiciclo.

Sección 12-6. Polarización de amplificadores clase B

Para evitar la distorsión en el cruce por cero, los transistores de un amplificador en clase B en contrafase tienen una pequeña corriente continua. Con una polarización por medio de un divisor de tensión, el punto *Q* es inestable y puede producirse el escape térmico. La polarización con diodos es preferible a la polarización por medio de divisor de tensión, porque produce un punto *Q* estable en un gran rango de temperaturas.

Sección 12-7. Excitación para un amplificador en clase B

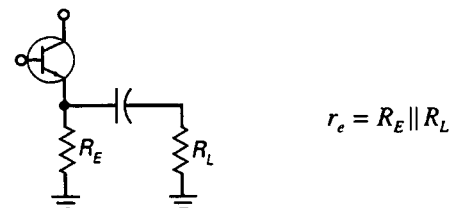
En vez de utilizar condensadores para acoplar la señal a la etapa de salida, se utiliza una etapa excitadora de acople directo. La corriente de colector de la etapa excitadora fija la corriente por los diodos de compensación.

Sección 12-8. Regulación de tensión

Combinando un diodo zener y un seguidor de emisor obtenemos un seguidor zener. Este circuito produce tensión de salida regulada con corrientes de carga grandes. La ventaja es que la corriente zener es mucho menor que la corriente por la carga. Añadiendo una etapa de ganancia de tensión se puede producir una gran tensión de salida regulada.

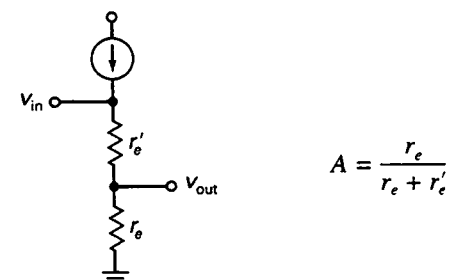
DEFINICIONES

(12-1) Resistencia de emisor AC:

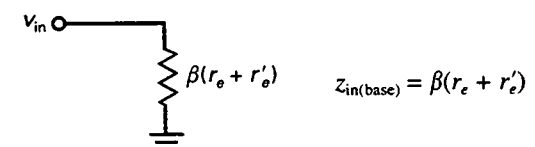


DERIVACIONES

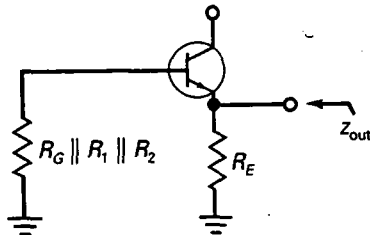
(12-2) Ganancia de tensión del seguidor de emisor:



(12-3) Impedancia de entrada de la base de un seguidor de emisor:

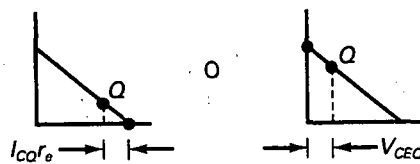


(12-5) Impedancia de salida del seguidor de emisor:



$$z_{out} = R_E \parallel \left(r'_e + \frac{R_G \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} \right)$$

(12-10) Pico máximo del seguidor de emisor:

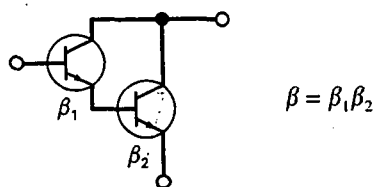


$$\begin{aligned} MP &= I_{CQ} r'_e \\ \text{or} \\ MP &= V_{CEQ} \end{aligned}$$

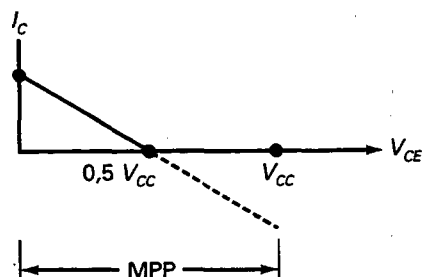
(12-11) MPP del seguidor de emisor:



(12-13) Ganancia de corriente del Darlington:



(12-15) Máxima salida en clase B:



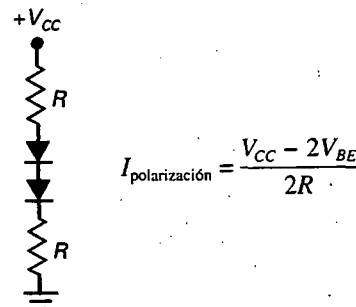
$$MPP = V_{CC}$$

(12-18) Potencia en el transistor clase B:



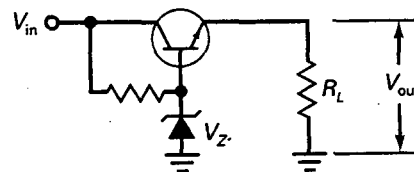
$$P_{D(máx)} = \frac{MPP^2}{40R_L}$$

(12-19) Polarización en clase B:



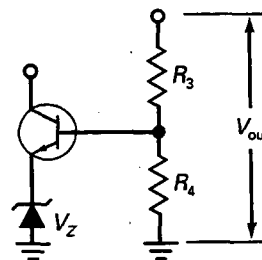
$$I_{polarización} = \frac{V_{CC} - 2V_{BE}}{2R}$$

(12-20) Seguidor con zener:



$$V_{out} = V_Z - V_{BE}$$

(12-23) Regulador de tensión:



$$V_{out} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} (V_Z + V_{BE})$$

EJERCICIOS PARA EL ALUMNO

CUESTIONES

- Un seguidor de emisor tiene una ganancia de tensión que es
 - Mucho menor que 1
 - Aproximadamente igual a 1
 - Mayor que 1
 - 0
- La resistencia total para señal de emisor de un seguidor de emisor es igual a
 - r_e'
 - r_e
 - $r_e + r_e'$
 - R_E
- La impedancia de entrada de la base de un seguidor de emisor normalmente
 - Es pequeña
 - Es grande
 - Está en cortocircuito hacia masa
 - Está en circuito abierto
- La corriente continua de emisor de un seguidor de emisor clase A es
 - La misma que la corriente alterna de emisor
 - V_E dividido entre R_E
 - V_C dividido entre R_C
 - La misma que la corriente por la carga
- La tensión alterna en la base de un seguidor de emisor aparece en
 - El diodo emisor
 - La resistencia para continua de emisor
 - La resistencia de carga
 - El diodo emisor y la resistencia externa para señal de emisor
- La tensión de salida de un seguidor de emisor aparece en
 - El diodo emisor
 - La resistencia para continua de colector
 - La resistencia de carga
 - El diodo emisor y la resistencia externa para señal de emisor
- Si $\beta = 200$ y $r_e = 150 \Omega$, la impedancia de la base es
 - $30 \text{ k}\Omega$
 - 600Ω
 - $3 \text{ k}\Omega$
 - 5Ω
- La tensión de entrada a un seguidor de emisor es
 - Menor que la tensión del generador
 - Igual a la tensión del generador
 - Mayor que la tensión del generador
 - Igual a la tensión de la fuente
- La corriente alterna de emisor es casi igual a
 - V_G dividida entre r_e
 - v_{in} dividida entre r_e'
 - V_G dividida entre r_e'
 - v_{in} dividida entre r_e
- La tensión de salida de un seguidor de emisor es aproximadamente
 - 0
 - V_G
 - v_{in}
 - V_{CC}
- La recta de carga para señal de un seguidor de emisor habitualmente es
 - La misma que la recta de carga para continua
 - Más horizontal que la recta de carga para continua
 - Más inclinada que la recta de carga para continua
 - Vertical
- Si la tensión de entrada a un seguidor de emisor es demasiado grande, la tensión de salida
 - Será menor
 - Será mayor
 - Será igual
 - Estará recortada
- Si el punto Q se halla en el centro de la recta de carga para continua, el recorte ocurrirá primero en
 - La excursión a la izquierda de la tensión
 - La oscilación hacia arriba de la corriente
 - El semiciclo positivo de entrada
 - El semiciclo negativo de entrada
- Si un seguidor de emisor tiene $V_{CEQ} = 5 \text{ V}$, $I_{CQ} = 1 \text{ mA}$ y $r_e = 1 \text{ k}\Omega$, la máxima excursión de salida no recortada es
 - 1 V
 - 2 V
 - 5 V
 - 10 V
- Si la resistencia de carga de un seguidor de emisor es muy grande, la resistencia externa para señal de emisor es igual a
 - La resistencia del generador
 - La impedancia de la base
 - La resistencia para continua de emisor
 - La resistencia para continua de colector
- Si un seguidor de emisor tiene $r_e' = 10 \Omega$ y $r_e = 90 \Omega$, entonces la ganancia de tensión es aproximadamente
 - 0
 - 0,5
 - 0,9
 - 1
- Si de un seguidor de emisor sale una onda cuadrada, este hecho implica
 - Que no hay recorte
 - Recorte en saturación
 - Recorte en el punto de corte
 - Recorte en ambos picos
- Un transistor Darlington tiene
 - Una impedancia de entrada muy pequeña
 - Tres transistores
 - Una ganancia de corriente muy grande
 - Una sola caída V_{BE}

19. La recta de carga para señal del seguidor de emisor es
 - a) La misma que la recta de carga para continua
 - b) Distinta de la recta de carga para continua
 - c) Horizontal
 - d) Vertical
20. Si la tensión del generador es de 5 mV en un seguidor de emisor, entonces la tensión de salida en la carga es aproximadamente
 - a) 5 mV
 - b) 150 mV
 - c) 0,25 V
 - d) 0,5 V
21. Si la resistencia de carga en la Figura 12-1a se pone en cortocircuito, ¿cuáles de los siguientes valores serán distintos de sus valores normales?
 - a) Sólo las tensiones alternas
 - b) Sólo las tensiones continuas
 - c) Tanto las tensiones continuas como las alternas
 - d) Ni las tensiones continuas ni las alternas
22. Si R_i está en circuito abierto en un seguidor de emisor, ¿cuál de las afirmaciones siguientes es cierta?
 - a) La tensión continua de base es V_{CC}
 - b) La tensión continua de colector es cero
 - c) La tensión de salida es normal
 - d) La tensión continua de base es cero
23. En general, la distorsión en un seguidor de emisor es
 - a) Muy pequeña
 - b) Muy grande
 - c) Grande
 - d) Inaceptable
24. La distorsión en un seguidor de emisor es
 - a) Rara vez pequeña
 - b) A menudo grande
 - c) Siempre pequeña
 - d) Grande cuando se produce el recorte
25. Si una etapa en EC está directamente acoplada a un seguidor de emisor, ¿cuántos condensadores de acoplo hay entre las dos etapas?
 - a) 0
 - b) 1
 - c) 2
 - d) 3
26. Un transistor Darlington tiene una β de 8.000. Si $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_L = 100 \Omega$, la impedancia de entrada de la base es aproximadamente
 - a) 8 k Ω
 - b) 80 k Ω
 - c) 800 k Ω
 - d) 8 M Ω
27. Los transistores en un seguidor de emisor clase B en contrafase están polarizados en o cerca de
 - a) El corte
 - b) El centro de la recta de carga para continua
 - c) La saturación
 - d) El centro de la recta de carga para señal
28. El escape térmico es
 - a) Bueno para los transistores
 - b) Siempre deseable
 - c) Útil a veces
 - d) En general destructivo
29. La resistencia para señal de los diodos de compensación
 - a) Se debe tener en cuenta
 - b) En general es tan pequeña que se puede ignorar
 - c) Compensa los cambios debidos a las variaciones de la temperatura
 - d) Es muy grande
30. Una corriente pequeña en el punto Q es necesaria en los amplificadores clase B en contrafase para evitar
 - a) El escape térmico
 - b) La destrucción de los diodos de compensación
 - c) La distorsión en el cruce por cero
 - d) Un excesivo consumo de corriente
31. La corriente zener en un seguidor con zener es
 - a) Igual a la corriente de salida
 - b) Menor que la corriente de salida
 - c) Mayor que la corriente de salida
 - d) Propensa al escape térmico
32. En el regulador de tensión con dos transistores, la tensión de salida
 - a) Está regulada
 - b) Tiene un rizado mucho menor que la tensión de entrada
 - c) Es mayor que la tensión zener
 - d) Todo lo anterior
33. Para que un seguidor de emisor clase B en contrafase funcione apropiadamente, los diodos de emisor deben
 - a) Ser capaces de controlar la corriente en el punto Q
 - b) Tener una limitación de potencia mayor que la potencia de salida
 - c) Tener una ganancia de tensión de 1
 - d) Igualarse a los diodos de compensación
34. El rendimiento máximo en un amplificador en clase B en contrafase es
 - a) 25 por 100
 - b) 50 por 100
 - c) 78,5 por 100
 - d) 100 por 100
35. La resistencia de emisor para señal de un seguidor de emisor
 - a) Es igual a la resistencia de emisor para continua
 - b) Es mayor que la resistencia de carga
 - c) No tiene efecto en MPP
 - d) Es normalmente menor que la resistencia de carga

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

1. Dibuje el diagrama esquemático de un seguidor de emisor. Explique por qué este circuito se usa tanto en amplificadores de potencia y reguladores de tensión.

2. Explique todo lo que sepa sobre la impedancia de salida de un seguidor de emisor.
3. Dibuje un par Darlington y explique por qué la ganancia de corriente total es el producto de las ganancias de corriente individuales.
4. Dibuje el esquema de un seguidor de emisor clase B en contrafase usando diodos de polarización complementarios. Describa el funcionamiento del circuito y comente sobre distorsión en el cruce por cero, máxima excursión de tensión a la salida y rendimiento.
5. Dibuje un seguidor con zener y explique por qué regula la tensión de salida contra cambios en la tensión de entrada.
6. ¿Cuál es la ganancia de tensión de un seguidor de emisor? Si es el caso, ¿en qué aplicaciones tal circuito podría ser útil?
7. Explique por qué un par Darlington tiene una ganancia de potencia mayor que un único transistor.
8. ¿Por qué son tan importantes los circuitos «seguidores» en los circuitos acústicos?
9. ¿Qué es la distorsión en el cruce por cero? ¿Cómo se puede eliminar?
10. ¿Cuál es la ganancia de tensión para señal aproximada en un amplificador en CC?
11. ¿Cuál es el otro nombre para un amplificador en colector común?
12. ¿Cuál es la relación entre la fase de una señal alterna (salida a entrada) y un amplificador en colector común?
13. Si un técnico mide una ganancia de tensión unidad (tensión de salida dividida por tensión de entrada) en un amplificador en CC, ¿cuál es su problema?
14. El amplificador Darlington se usa en el amplificador de potencia final de la mayoría de los amplificadores de audio de alta calidad porque in-

crementa la ganancia de potencia. ¿Cómo se incrementará la potencia en un amplificador Darlington?

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 12-1. Amplificador en CC

- 12-1. En la Figura 12-30, ¿cuánto vale la impedancia de entrada de la base si $\beta = 200$? ¿Y la impedancia de entrada de la etapa?
- 12-2. Si $\beta = 150$ en la Figura 12-30, ¿cuál es la tensión de entrada al seguidor de emisor?
- 12-3. ¿Cuál es la ganancia de tensión en la Figura 12-30? Si $\beta = 175$, ¿cuál es la tensión en la carga para señal?
- 12-4. ¿Cuánto vale la tensión de entrada en la Figura 12-30 si β fluctúa en un intervalo de 50 a 300?
- 12-5. Todas las resistencias se duplican en el circuito de la Figura 12-30. ¿Qué sucederá con la impedancia de entrada de la etapa si $\beta = 150$? ¿Y con la tensión de entrada?
- 12-6. ¿Cuánto vale la impedancia de entrada de la base si $\beta = 200$ en la Figura 12-31? ¿Y la impedancia de entrada de la etapa?
- 12-7. Si $\beta = 150$ y $v_{in} = 1$ V en la Figura 12-31, ¿cuál es la tensión de entrada al seguidor de emisor?
- 12-8. ¿Cuál es la ganancia de tensión en la Figura 12-31? Si $\beta = 175$, ¿cuál es la tensión en la carga para señal?

Sección 12-2. Impedancia de salida

- 12-9. ¿Cuál es la impedancia de salida en la Figura 12-30 si $\beta = 200$?
- 12-10. ¿Cuál es la impedancia de salida en la Figura 12-31 si $\beta = 150$?

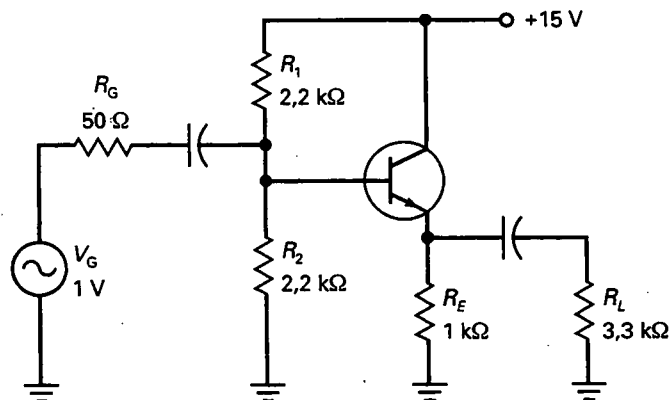


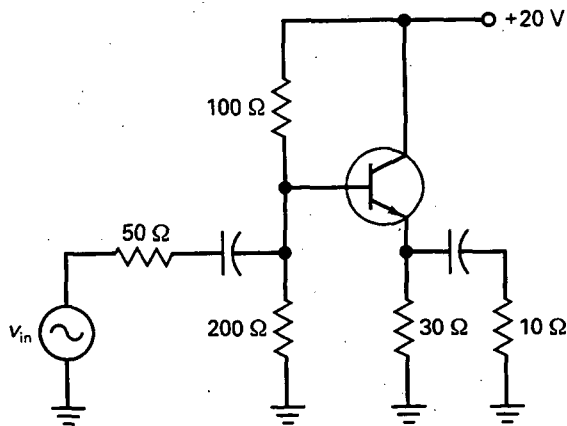
Figura 12-30

Sección 12-3. Excursión máxima de salida

- 12-11. ¿Cuáles son los valores de I_{CQ} , V_{CEQ} y r_e en la Figura 12-30?
- 12-12. ¿Cuál es la máxima tensión de salida pico a pico en la Figura 12-30?
- 12-13. ¿Cuáles son los valores de I_{CQ} , V_{CEQ} y r_e en la Figura 12-31?
- 12-14. ¿Cuál es la máxima tensión de salida pico a pico en la Figura 12-31?

Sección 12-4. Conexiones Darlington

- 12-15. Si el par Darlington de la Figura 12-32 tiene una ganancia de corriente total de 5.000, ¿cuál es la impedancia de entrada de la base Q_1 ?
- 12-16. En la Figura 12-32, ¿cuál es la tensión alterna de entrada a la base Q_1 si el par Darlington tiene una corriente total de 7.000?
- 12-17. Ambos transistores tienen una β de 150 en el circuito de la Figura 12-33. ¿Cuánto vale la impedancia de entrada de la primera base?

**Figura 12-31**

- 12-18. En la Figura 12-33, ¿cuál es la tensión alterna de entrada a la base Q_1 si el par Darlington tiene una corriente total de 2.000?

Sección 12-5. Seguidor de emisor Clase B en contrafase

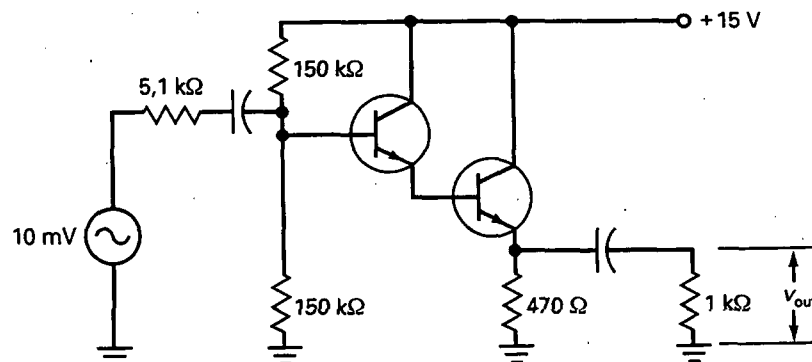
- 12-19. La recta de carga para señal de un seguidor de emisor clase B en contrafase tiene una tensión de corte de 12 V. ¿Cuál es el MPP?
- 12-20. Un seguidor de emisor clase B en contrafase tiene una $R_L = 150 \Omega$ y $r_e = 5 \Omega$. ¿Cuál es la ganancia de tensión?
- 12-21. $R_L = 220 \Omega$ y $r_e = 7 \Omega$ en un seguidor de emisor clase B en contrafase. ¿Cuál es la impedancia de entrada de la base si $\beta = 60$?
- 12-22. ¿Cuál es la máxima disipación de potencia en cada transistor de la Figura 12-34?
- 12-23. ¿Cuál es la máxima potencia de salida en la Figura 12-34?

Sección 12-6. Polarización de amplificadores clase B

- 12-24. ¿Cuál es la corriente de polarización de colector en el circuito de la Figura 12-35?
- 12-25. En la Figura 12-35, ¿cuál es el máximo rendimiento del amplificador?
- 12-26. Si las resistencias de polarización de la Figura 12-35 se cambian a 1 kΩ, ¿cuál es la corriente de polarización del colector? ¿Y el rendimiento del amplificador?

Sección 12-8. Regulación de tensión

- 12-27. El transistor de la Figura 12-36 tiene una ganancia de corriente de 150. Si el 1N958 tiene una tensión zener de 7,5 V, ¿cuál es la tensión de salida? ¿Y la corriente zener?

**Figura 12-32**

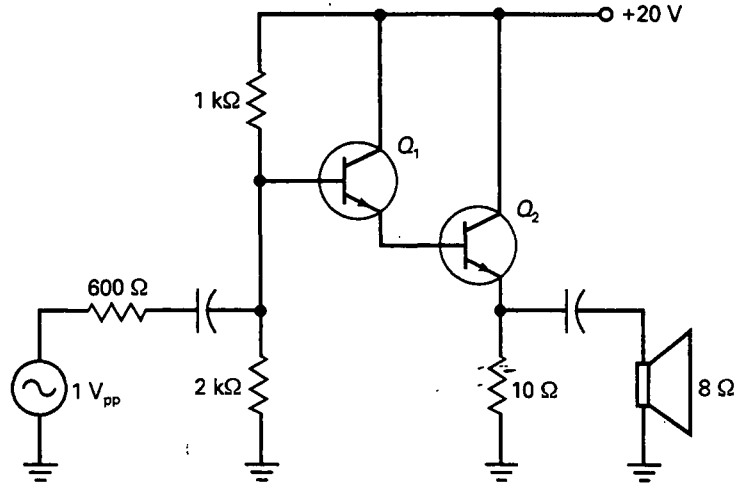


Figura 12-33

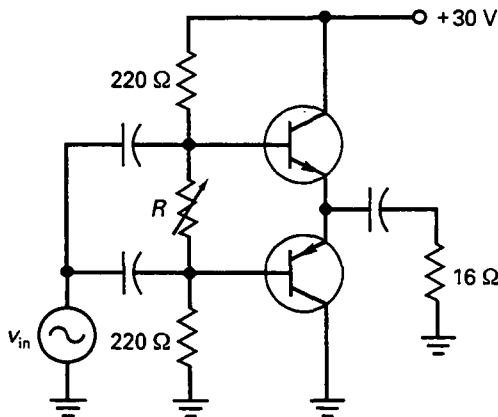


Figura 12-34

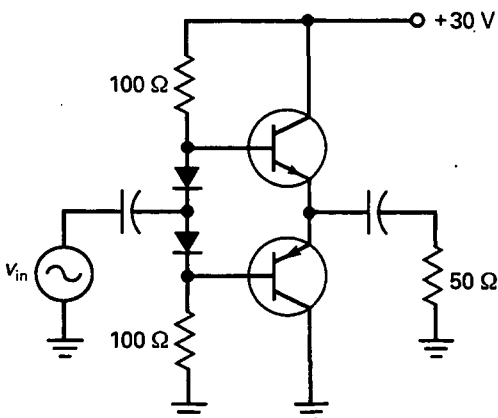


Figura 12-35

- 12-28. Si la tensión de entrada de la Figura 12-36 cambia a 25 V, ¿cuál es la tensión de salida? ¿Y la corriente zener?
- 12-29. El potenciómetro de la Figura 12-37 puede variar de 0 a 1 kΩ. ¿Cuál es la tensión de salida cuando el potenciómetro está en su posición central?
- 12-30. ¿Cuál es la tensión de salida en la Figura 12-37 si el potenciómetro está al máximo? ¿Y si está al mínimo?

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 12-31. En la Figura 12-36, ¿cuál es la potencia disipada del transistor si la ganancia de corriente es 100 y la tensión zener es 7,5 V?
- 12-32. En la Figura 12-38a, el transistor tiene una β_{dc} de 150. Calcule los siguientes valores de continua: V_B , V_E , V_C , I_E , I_C e I_B .
- 12-33. Si una señal de entrada con un valor pico a pico de 5 mV excita el circuito de la Figura 12-38a, ¿cuáles son las dos tensiones alternas

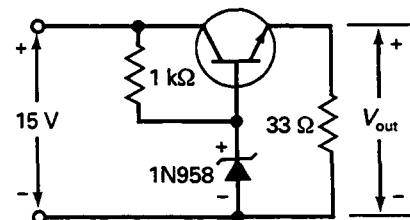


Figura 12-36

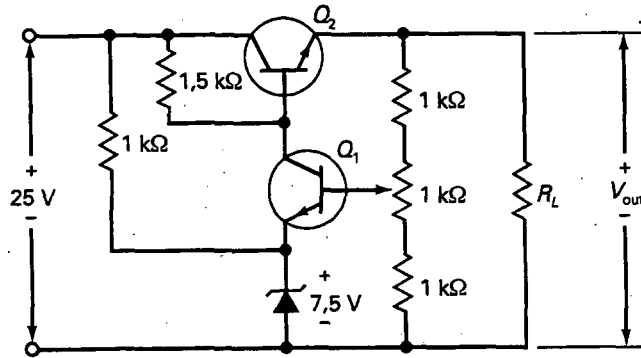


Figura 12-37

- de salida? ¿Para qué cree el lector que puede servir este circuito?
- 12-34. En la Figura 12-38b se muestra un circuito en el que la tensión de control puede estar entre 0 V o +5 V. Si la tensión de entrada de audio es de 10 mV pico a pico, ¿cuánto valdrá la tensión de salida de audio cuando la tensión de control sea de 0 V? ¿Y cuando la tensión de control sea de +5 V? ¿Para qué cree el lector que está diseñado este circuito?
- 12-35. ¿Cuál es la máxima potencia de salida en la Figura 12-39?
- 12-36. En la Figura 12-39, ¿cuál es la ganancia de tensión de la primera etapa si $\beta = 200$?
- 12-37. Si Q_3 y Q_4 tienen ganancias de corriente de 200 en la Figura 12-39, ¿cuál es la ganancia de tensión de la segunda etapa?
- 12-38. ¿Cuál es la corriente de polarización de colector en la Figura 12-39?

- 12-39. ¿Cuál es la ganancia de tensión total para el amplificador de 3 etapas de la Figura 12-39?

DETECTOR DE AVERÍAS

Emplee la Figura 12-40 para los problemas restantes. En este detector de averías se miden sólo tensiones alternas. El cuadro grande titulado «Milivoltios» contiene las mediciones de las tensiones alternas expresadas en milivoltios. Por ejemplo, la muestra C_4 tiene un valor de 50, equivalente a 50 mV. Para este ejercicio, todas las resistencias funcionan correctamente. Los fallos se limitan a condensadores en circuito abierto, cables de conexión en circuito abierto y transistores en circuito abierto.

- 12-40. Localice los fallos de T1 a T3.

- 12-41. Localice los fallos de T4 a T7.

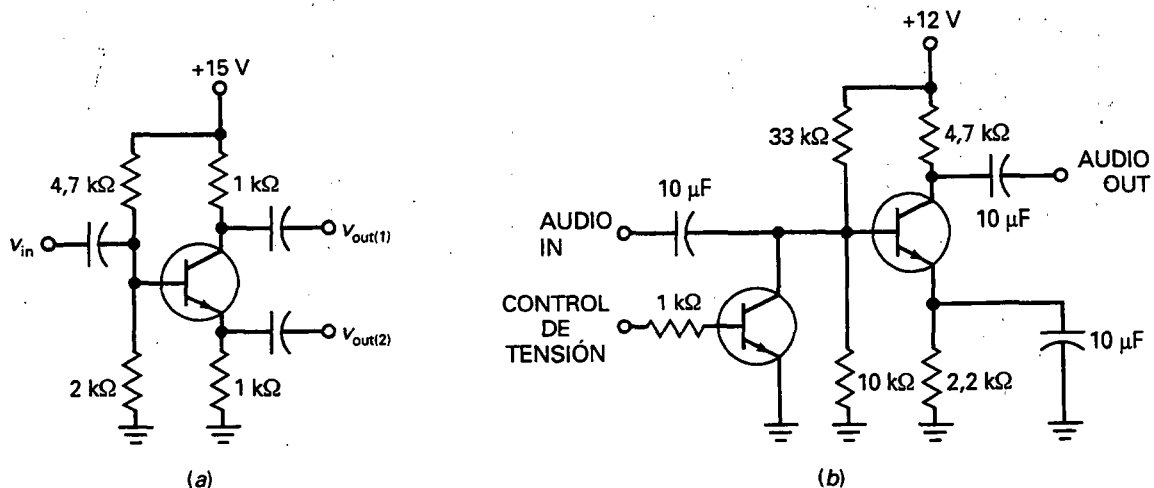


Figura 12-38

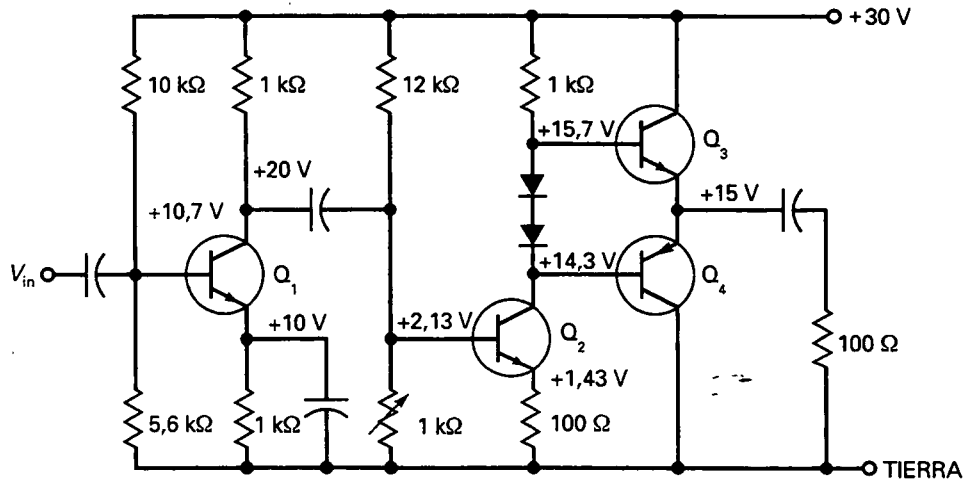
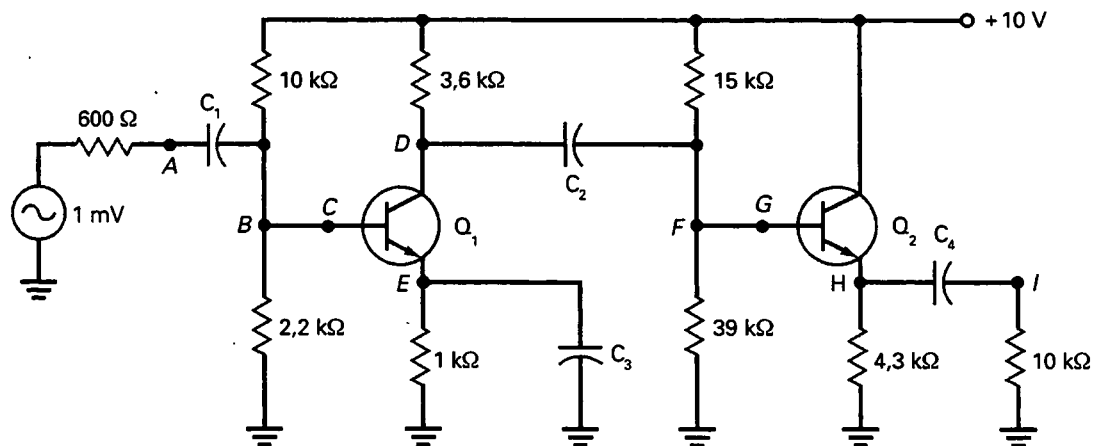


Figura 12-39



OK	T1	T2	T3
$V_A: B2$	$V_A: A2$	$V_A: G7$	$V_A: A3$
$V_B: G7$	$V_B: C5$	$V_B: C5$	$V_B: A7$
$V_C: D4$	$V_C: D4$	$V_C: B7$	$V_C: D3$
$V_D: C6$	$V_D: D2$	$V_D: B3$	$V_D: E2$
$V_E: D5$	$V_E: B4$	$V_E: B3$	$V_E: E2$
$V_F: A6$	$V_F: C6$	$V_F: D2$	$V_F: G2$
$V_G: F5$	$V_G: G1$	$V_G: B6$	$V_G: B6$
$V_H: B3$	$V_H: A6$	$V_H: A7$	$V_H: G6$
$V_I: G1$	$V_I: E2$	$V_I: B4$	$V_I: B4$

T4	T5	T6	T7
$V_A: C2$	$V_A: E7$	$V_A: B2$	$V_A: C5$
$V_B: A1$	$V_B: B5$	$V_B: C1$	$V_B: A2$
$V_C: E7$	$V_C: E2$	$V_C: B7$	$V_C: C1$
$V_D: C3$	$V_D: C7$	$V_D: A4$	$V_D: B3$
$V_E: B5$	$V_E: B6$	$V_E: E2$	$V_E: A7$
$V_F: C3$	$V_F: E5$	$V_F: C7$	$V_F: D7$
$V_G: B1$	$V_G: B4$	$V_G: D3$	$V_G: B3$
$V_H: E4$	$V_H: A7$	$V_H: A7$	$V_H: D3$
$V_I: A5$	$V_I: F4$	$V_I: D5$	$V_I: G2$

	1	2	3	4	5	6	7
A	0,75	0,6	1	95	2	70	0
B	2	0,6	70	0	0,75	0	0,6
C	0,6	0,75	2	50	0,6	70	0
D	95	70	0	0,6	0	32	70
E	0,75	0	14	2	0	70	0,75
F	95	95	70	0	70	19	3
G	70	0	39	2	28	0	0,6

MILIVOLTIOS

Figura 12-40