

PRACTICA 16

Amplificadores de potencia. Clase A y clase B

16.1. INTRODUCCION

Hasta aquí, hemos sido capaces de amplificar señales de bajo nivel convirtiéndolas en variaciones de tensión verdaderamente importantes, empleando para ello una o varias etapas amplificadoras.

Generalmente, se requiere una señal de salida capaz de entregar suficiente potencia a un dispositivo externo que actúa como carga.

Si a los circuitos estudiados hasta ahora les aplicáramos alguna de estas cargas, estarían condenados al fracaso, pues éstas presentan bajas impedancias internas, mientras aquéllas poseen impedancias de salida elevadas. Es, por tanto, necesaria la conexión de circuitos capaces de gobernar las corrientes exigidas por esas cargas.

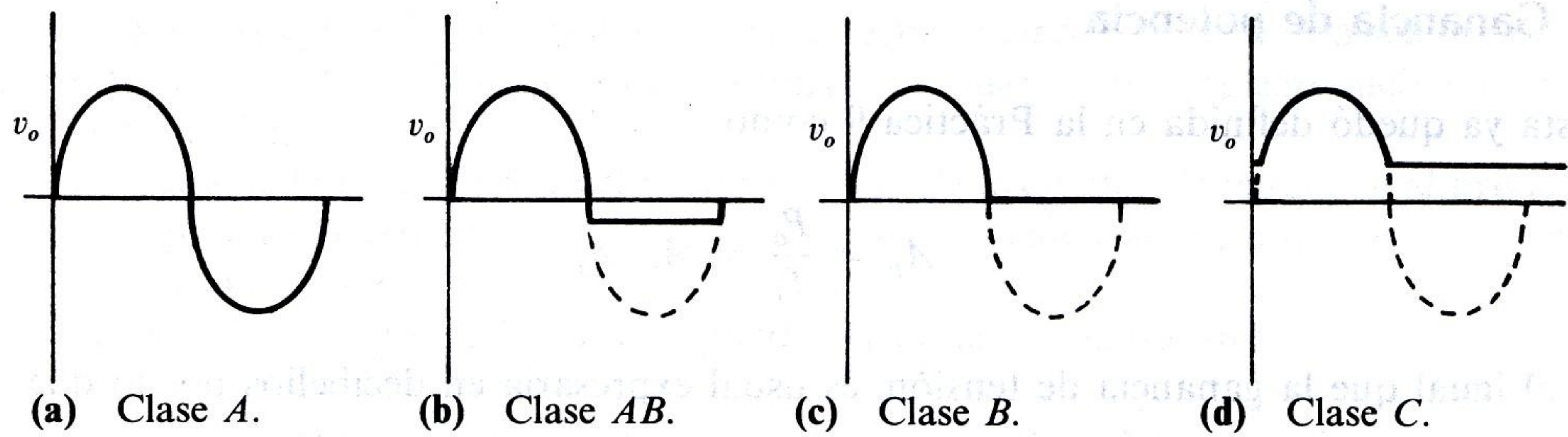
Nos disponemos al estudio de los amplificadores de potencia atendiendo además, a las clases más importantes.

16.2. DESCRIPCION BASICA

Cuando una señal de entrada a un circuito presenta un voltaje de amplitud suficiente, las etapas conectadas a continuación han de entregar ganancia de corriente para, de esta forma, poder excitar convenientemente a la carga. Estas etapas se llaman comúnmente **amplificadores de potencia** o **etapas de potencia** y se dividen básicamente en cuatro grupos o clases: **A**, **B**, **AB** y **C**, dependiendo de la forma de la señal de salida, a partir de una entrada senoidal.

Un amplificador clase *A* ofrece una señal de salida igual a la de entrada, pero amplificada. En clase *AB* la salida está amplificada algo más de la mitad de la señal de entrada; en clase *B* sólo un semiciclo y en clase *C* parte de un semiciclo de dicha señal (Gráfica 16.1).

Antes del estudio de cada tipo exponemos algunos conceptos sobre las etapas de potencia.



Gráfica 16.1. Salidas de los amplificadores de potencia.

■ Rendimiento

Expresa la relación entre la máxima potencia de corriente alterna entregada a la carga ($P_{L\text{máx}}$) y la potencia dada por la fuente de alimentación (P_{CC}). Se suele expresar en porcentaje y es

$$\eta = \frac{P_{L\text{máx}}}{P_{CC}} \cdot 100$$

■ Potencia disipada en la carga

La potencia de corriente alterna disipada en la carga es

$$P_L = \frac{v_{Lef}^2}{R_L} = \frac{v_{Lpp}^2}{8 \cdot R_L}$$

siendo v_{Lef} y v_{Lpp} los valores eficaz y de pico a pico, respectivamente, de la tensión en la carga.

■ Máxima potencia disipada en la carga

Cuando la señal aplicada a la carga es la máxima posible sin distorsión, la carga disipará la máxima potencia y ésta es

$$P_{L\text{máx}} = \frac{v_{Lpp\text{máx}}^2}{8 \cdot R_L}$$

donde $v_{Lpp\text{máx}}$ es la máxima tensión pico a pico conseguida en la carga.

■ Ganancia de potencia

Esta ya quedó definida en la Práctica 9 como

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = A_v \cdot A_i$$

y, al igual que la ganancia de tensión, es usual expresarla en decibelios por lo que

$$A'_p = 10 \log A_p$$

y de la misma forma se establece una relación entre la ganancia «normal» y la expresada en dB; así, cada 3 dB de incremento, la ganancia aumenta en un factor «2». Por ejemplo, si

$$\begin{array}{ll} A_p = 1 & A'_p = 0 \text{ dB} \\ A_p = 4 & A'_p = 6 \text{ dB} \\ A_p = 32 & A'_p = 15 \text{ dB} \end{array}$$

de igual manera se relacionan los crecimientos negativos.

Por el mismo método, cada 10 dB que crece la ganancia, ésta se ha multiplicado por 10.

El amplificador clase *A* ofrece como ventaja, que la señal de salida no aparece distorsionada y como principal inconveniente, que su rendimiento máximo es de un 25 por 100 y de un 50 por 100 cuando la carga es acoplada por transformador.

Cuando se emplea un amplificador clase *B*, se obtiene la salida fuertemente distorsionada, convirtiéndose en su principal inconveniente, ya que se hace necesario disponer un doble circuito, para amplificar la señal completa; sin embargo, presenta rendimientos elevados, del orden del 70 por 100 al 75 por 100.

La disposición clase *AB* se emplea para paliar los inconvenientes que, como más adelante se verá, presentan los amplificadores clase *B*, logrando rendimientos muy próximos a ella.

Por último, los amplificadores clase *C* presentan excelentes rendimientos y, debido a su señal de salida, como tales amplificadores de potencia, se emplean en R.F., encontrando además, utilidad en circuitos recortadores de impulsos o niveles, cuando interesan solamente las señales que superan un determinado nivel.

16.3. FUNCIONAMIENTO

• Amplificadores clase *A*

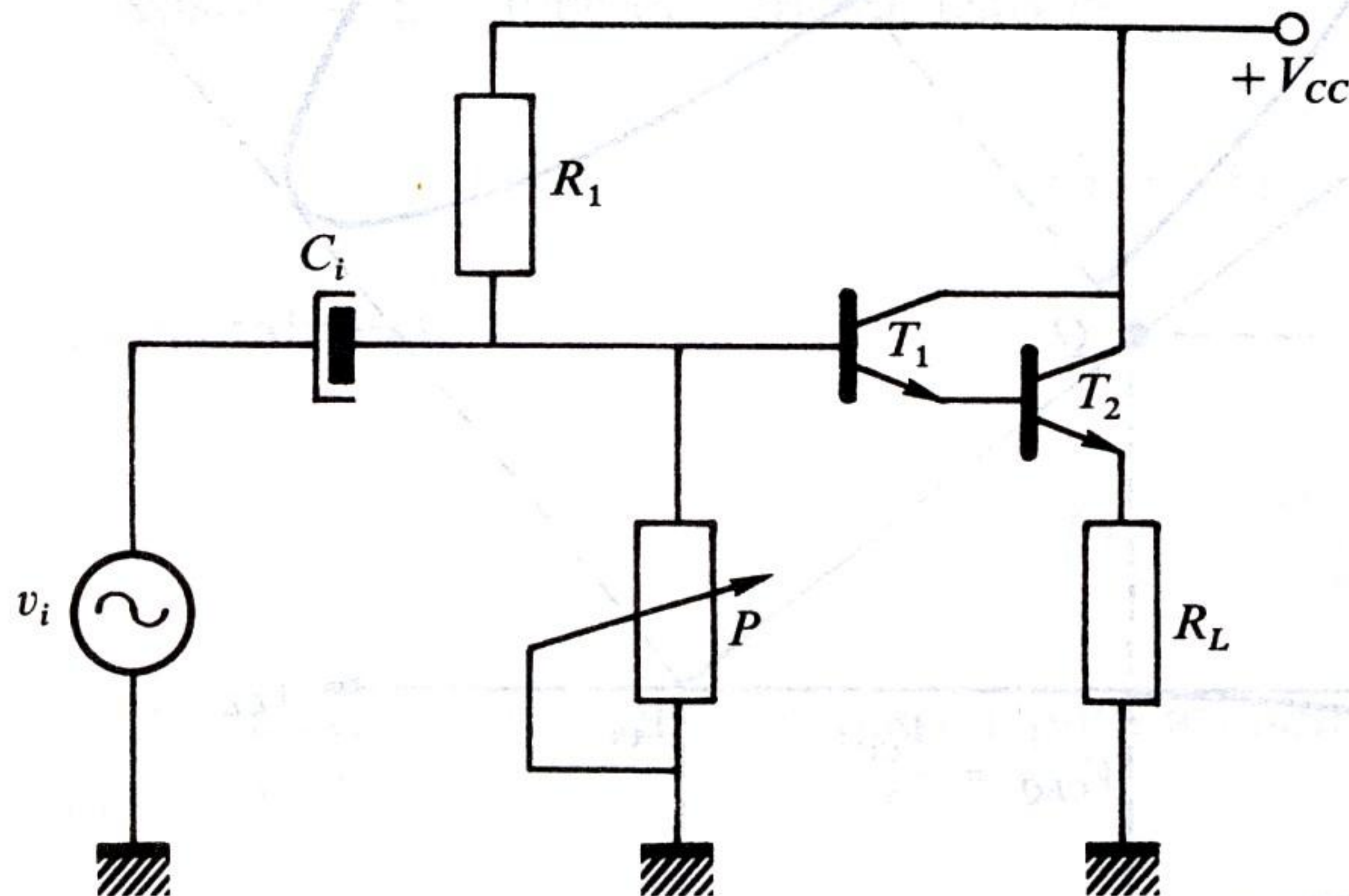
Un amplificador clase *A* es aquel que presenta a su salida una señal copia de la de entrada, pero amplificada y sin distorsión.

En este caso la máxima señal de salida se obtendrá cuando el punto estático coincida con el centro de la recta de carga, consiguiendo, por tanto, la máxima potencia de salida.

Se pueden presentar dos casos en cuanto a la conexión de la carga, esto es, que la carga, a la que hay que aplicar la potencia, sea externa al circuito o, que ésta sea la propia carga del transistor. A pesar de su escasa utilización, cuando se emplean suele coincidir con esta última disposición.

Ambos casos se han de ver bajo el punto de vista de las rectas de carga: en el primero, son distintas para c.c. y para c.a. y en el segundo caso coinciden para cargas resistivas (éste será el que estudiaremos).

Un amplificador de potencia clase A puede ser el de la Figura 16.1.



- $R_1 = 220 \text{ k}\Omega, 1/2 \text{ W}$
- $P = 470 \text{ k}\Omega, 1/2 \text{ W}$
- $R_L = 47 \text{ }\Omega, 1/2 \text{ W}$
- $T_1 = \text{BC548B}$
- $T_2 = \text{BD137}$
- $C_i = 22 \text{ }\mu\text{F}/25 \text{ V}$
- $V_{CC} = 10 \text{ V}$
- $v_i = \text{GBF}$

Figura 16.1. Amplificador de potencia clase A.

Nótese que es un par Darlington para aprovechar su elevada ganancia de corriente. En todo caso, la ganancia total obtenida será de corriente, manteniéndose la tensión de salida prácticamente al mismo nivel que la de entrada y cumpliendo, por tanto, las características de los amplificadores de potencia.

La máxima ganancia se obtendrá cuando el punto Q se sitúe en el centro de la recta de carga (Gráfica 16.2). Estudiemos en estas circunstancias el rendimiento del circuito:

Si despreciamos la corriente consumida por el divisor R_1, P , tendremos que si

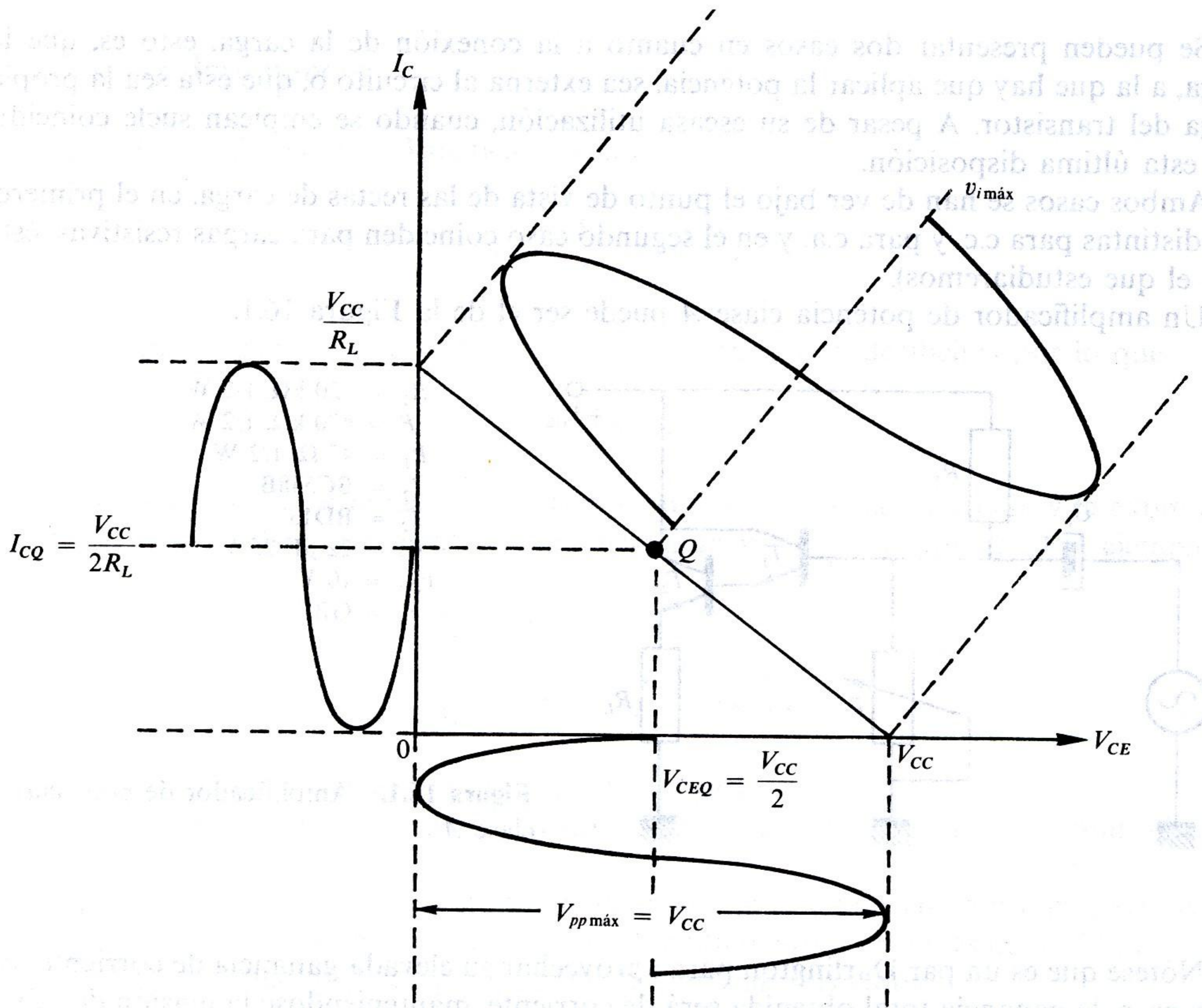
$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2}$$

entonces

$$V_{CEQ} = V_{R_L}$$

por lo que la potencia será

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_C = V_{CC} \cdot \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L} = V_{CC} \cdot \frac{V_{CC} - \frac{V_{CC}}{2}}{R_L} = V_{CC} \cdot \frac{\frac{V_{CC}}{2}}{R_L} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$



Gráfica 16.2. Recta de carga y punto Q en clase A.

Esta será la potencia media absorbida en todo momento por el circuito de la f.a., ya que un desplazamiento del punto Q, provocado por una señal senoidal, da un valor medio «0» de variación de I_C .

Por otra parte, la máxima potencia disipada en la carga corresponderá al caso en que la señal de entrada provoque que el punto de trabajo recorra toda la recta de carga, esto es $v_{i\text{máx}}$, dando como resultado una señal de salida de valor pico a pico, igual a V_{CC} y entonces dicha potencia será

$$P_{L\text{máx}} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L}$$

ya que $V_{CC} = V_{pp\text{máx}}$, todo esto da como resultado un rendimiento

$$\eta = \frac{P_{L\text{máx}}}{P_{CC}} \cdot 100 = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{2R_L}} \cdot 100 = \frac{2R_L}{8R_L} \cdot 100 = 25 \%$$

Se ha de tener en cuenta, que este rendimiento es el máximo que puede obtenerse en un amplificador clase *A*, ya que, si la señal de entrada disminuye, lo hace la tensión de salida y, por tanto, el rendimiento. Por otra parte, si la carga se acopla externamente al circuito, es decir, no es la resistencia de carga del transistor, la potencia efectiva aplicada a la carga será sólo una parte de la entregada por el circuito, disipando una parte importante la propia resistencia de carga del circuito.

Es conveniente, además, conocer la potencia que ha de disipar el transistor para no sobrepasar sus especificaciones. Para amplificadores clase *A*, la máxima disipación del transistor se produce en reposo, esto es,

$$P_T = V_{CEQ} \cdot I_{CQ}$$

y, generalmente,

$$P_T = \frac{V_{CC} \cdot I_{CQ}}{2}$$

A medida que la tensión pico a pico aumenta en la carga, la potencia disipada en el transistor decrece.

• Amplificadores clase *B*

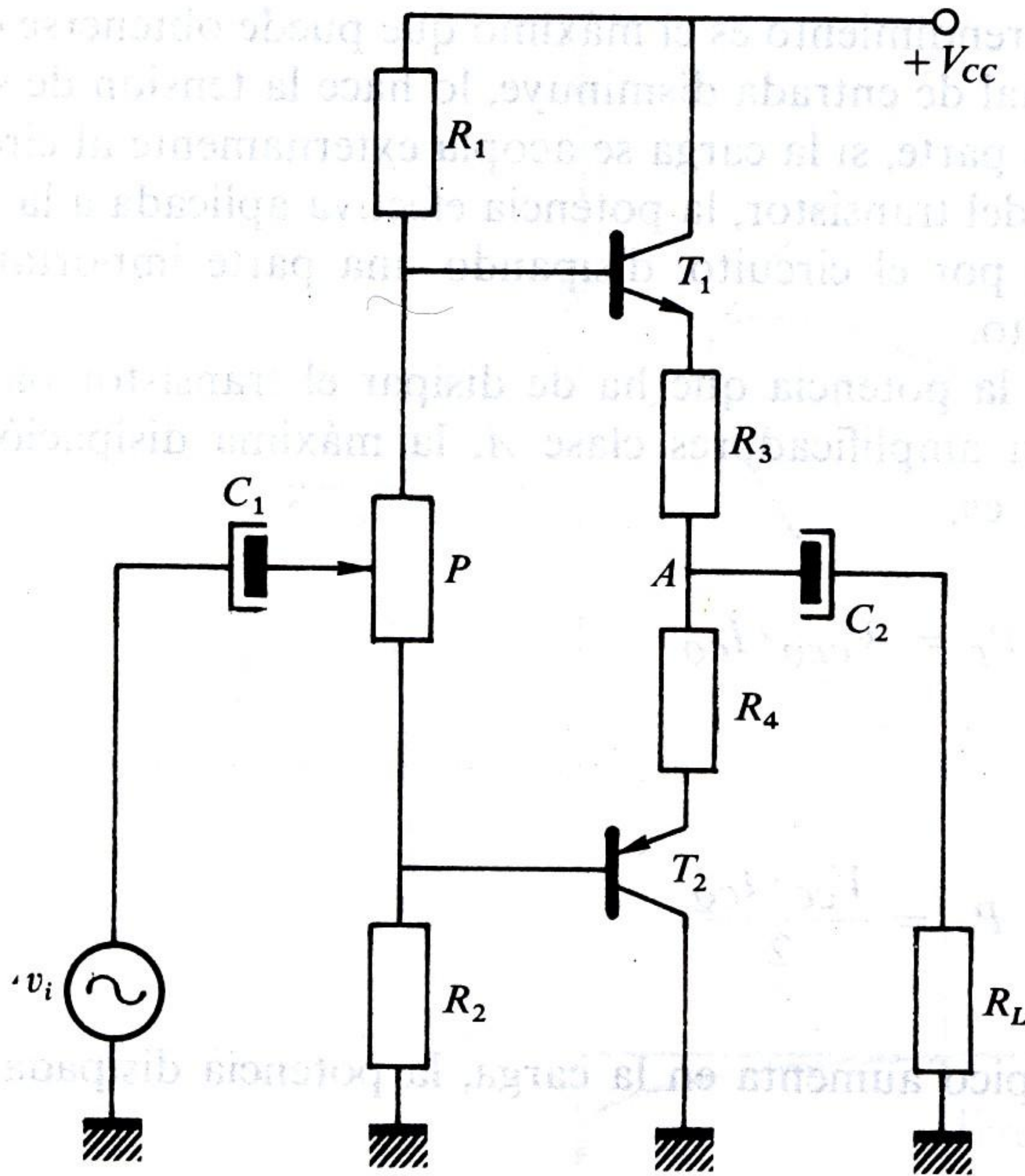
Un amplificador clase *B* amplifica un solo semiciclo de la señal de entrada; esto implica situar el punto de trabajo en la región de corte, de tal forma, que sólo al presentarse el semiciclo adecuado de v_i , el transistor pase a la región activa. Cuando el semiciclo es el contrario, el transistor permanece en corte, al igual que en ausencia de señal de entrada.

Si se quiere obtener una señal de salida reflejo de la de entrada, se habrán de disponer de forma adecuada, dos transistores, para que cada uno amplifique un semiciclo. La Figura 16.2 muestra esta disposición, llamada generalmente amplificador de **simetría complementaria** o **push-pull**.

Se puede observar que T_1 es *NPN* y T_2 es *PNP* y, ambos, son complementarios, es decir, presentan iguales características eléctricas, pero de signos opuestos, al ser uno *PNP* y otro *NPN*. Se denominan generalmente **par complementario** o, simplemente, **transistores complementarios**.

La forma básica de alimentar el circuito es disponiendo de una fuente simétrica, que proporciona tensiones $+V_{CC}$ y $-V_{CC}$, conectando la masa o referencia de la fuente a un punto común con v_i y R_L . Debido a este inconveniente, es más usual el empleo de una sola fuente, haciendo C_2 las veces de tal para T_2 , ya que, como más adelante se verá, cuando este transistor conduzca, queda aislado de $+V_{CC}$ porque T_1 permanece en corte.

Al ser C_2 de una capacidad elevada (siendo un cortocircuito para la señal de salida), al conducir T_1 adquiere carga suficiente a través de T_1 , R_3 y R_L ; cuando T_1 se corta, la tensión en extremos del condensador hace de fuente para T_2 . Por su elevada capacidad pierde una parte considerablemente pequeña de su carga, que repondrá cuando T_1 conduzca de nuevo.



- $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega, 1/2 \text{ W}$
- $R_3 = R_4 = 1 \Omega, 1 \text{ W bobinada}$
- $R_L = 22 \Omega, 4 \text{ W}$
- $C_1 = 22 \mu\text{F}/25 \text{ V}$
- $C_2 = 1000 \mu\text{F}/25 \text{ V}$
- $P = 2 \text{ k } 2 \Omega$
- $T_1 = \text{BD137}$
- $T_2 = \text{BD138}$
- $V_{CC} = 12 \text{ V}$
- $v_i = \text{GBF}$

Figura 16.2. Amplificador clase B en simetría complementaria.

R_1 , P y R_2 componen un divisor de tensión capaz de hacer permanecer a cada transistor en corte, hasta que se aplique v_i , cuyos semiciclos positivo y negativo harán conducir a T_1 y T_2 respectivamente, circulando por R_L corriente durante todo el ciclo de v_i .

Mediante el ajuste de P , se consigue que la tensión entre emisor y colector de cada transistor sea exactamente $V_{CC}/2$, con lo que se asegura la igualdad de las polarizaciones de ambos transistores.

Si tomamos un modelo simplificado, podría ser el de la Figura 16.3.

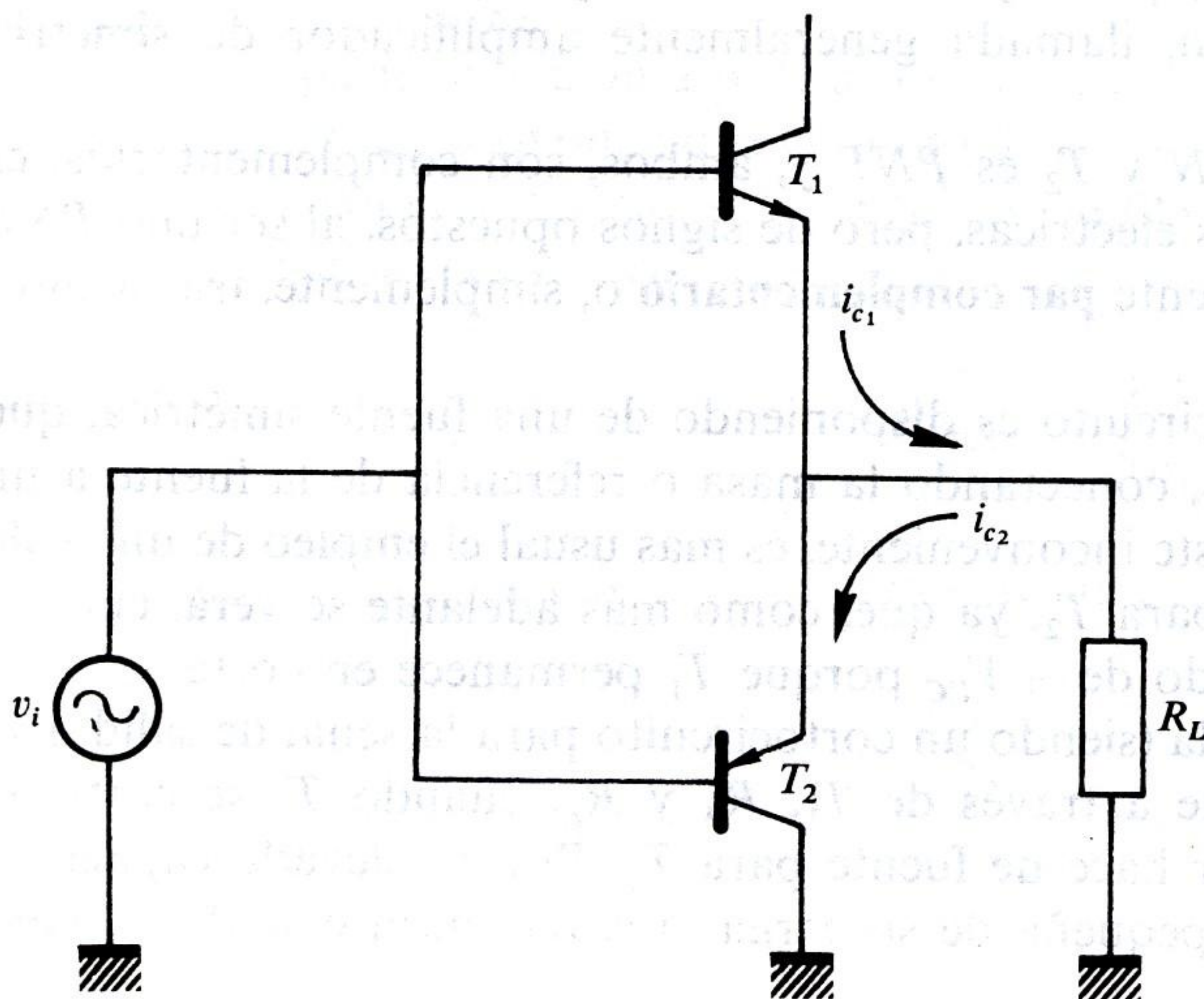
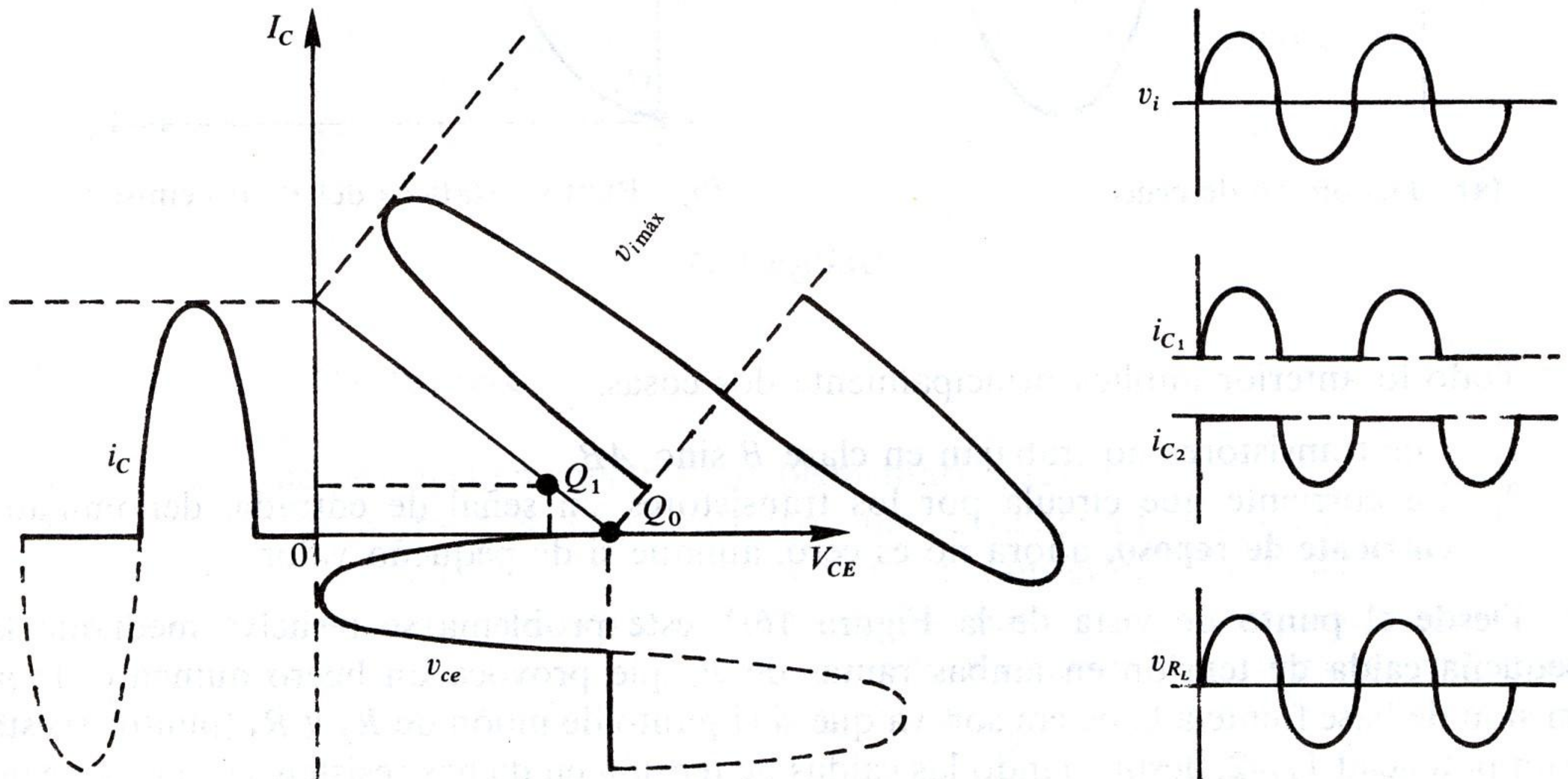


Figura 16.3. Amplificador en simetría complementaria simplificado.

La Gráfica 16.3a muestra el punto de reposo Q_0 para cada uno de los transistores; en estas condiciones, no circula corriente por el circuito de colector de los transistores en ausencia de señal de entrada. Al llegar el semiciclo positivo de v_i , T_1 pasa a la región activa y circula una corriente i_{C_1} que provoca una caída de tensión en $R_L (v_{R_L})$. Cuando el semiciclo positivo se extingue, T_1 pasa a la situación de corte y al aparecer el semiciclo negativo T_2 entra en la región activa, provocando una i_{C_2} que produce una caída de tensión en R_L (Gráfica 16.3b).

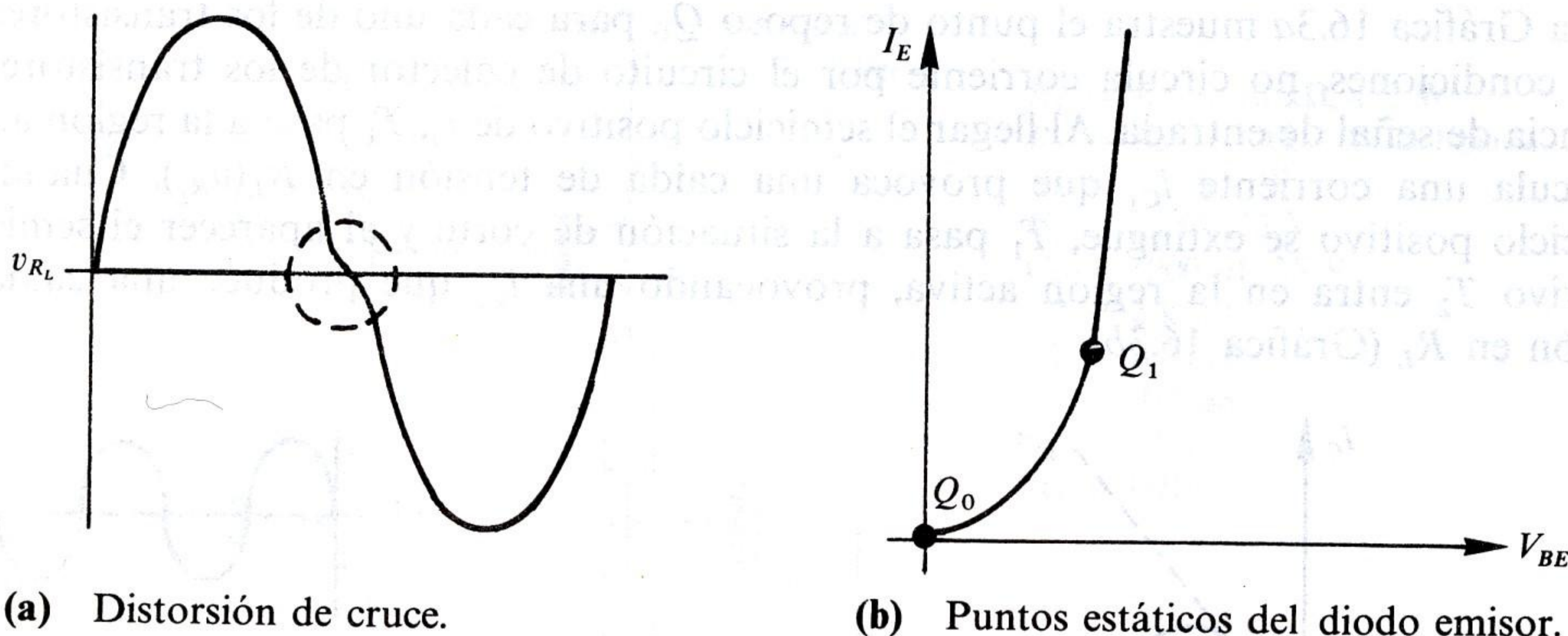


Gráfica 16.3. (a) Punto de reposo de un amplificador clase B. (b) Relación de señales de un amplificador de simetría complementaria.

Apréciase que ambos transistores están configurados en C.C., por tanto, la ganancia de tensión es próxima a 1 y la ganancia de corriente elevada. Además, la máxima potencia se obtiene en la carga cuando v_i alcanza su máxima amplitud, provocando el máximo desplazamiento del punto de trabajo, que coincide con la máxima potencia requerida de la fuente de alimentación.

La forma de onda en R_L en situaciones reales, no es una senoide perfecta si los transistores permanecen estrictamente en el corte, sino que es según aparece en la Gráfica 16.4a.

Si los transistores permanecen en corte, la tensión en R_L empieza a manifestarse desde que el transistor comienza a conducir; como v_i se aplica entre base y emisor, la zona no lineal de la característica de este diodo se hace manifiesta, debido a la situación de su punto de reposo Q_0 (Gráfica 16.4b). Si el punto de trabajo se desplaza hasta Q_1 (Gráficas 16.3a y 16.4b), esta zona se excluye de la región de trabajo normal de los transistores, y cuando la señal de entrada los excita, éstos trabajan en la región totalmente lineal de su característica, dando como resultado la eliminación de la distorsión expuesta anteriormente, llamada *distorsión de cruce*, la cual se produce en el momento del «cruce» de la conducción de un transistor a la del otro.



Gráfica 16.4.

Todo lo anterior implica principalmente dos cosas:

1. Los transistores no trabajan en clase *B* sino *AB*.
2. La corriente que circula por los transistores sin señal de entrada, denominada **corriente de reposo**, ahora no es cero, aunque sí de pequeño valor.

Desde el punto de vista de la Figura 16.2, este problema se resuelve mediante la pequeña caída de tensión en ambas ramas de *P*, que provoca un ligero aumento de la tensión de base frente a la de emisor, ya que si el punto de unión de R_3 y R_4 (punto *A*) está a un potencial $V_{CC}/2$, despreciando las caídas de tensión en dichas resistencias, por su bajo

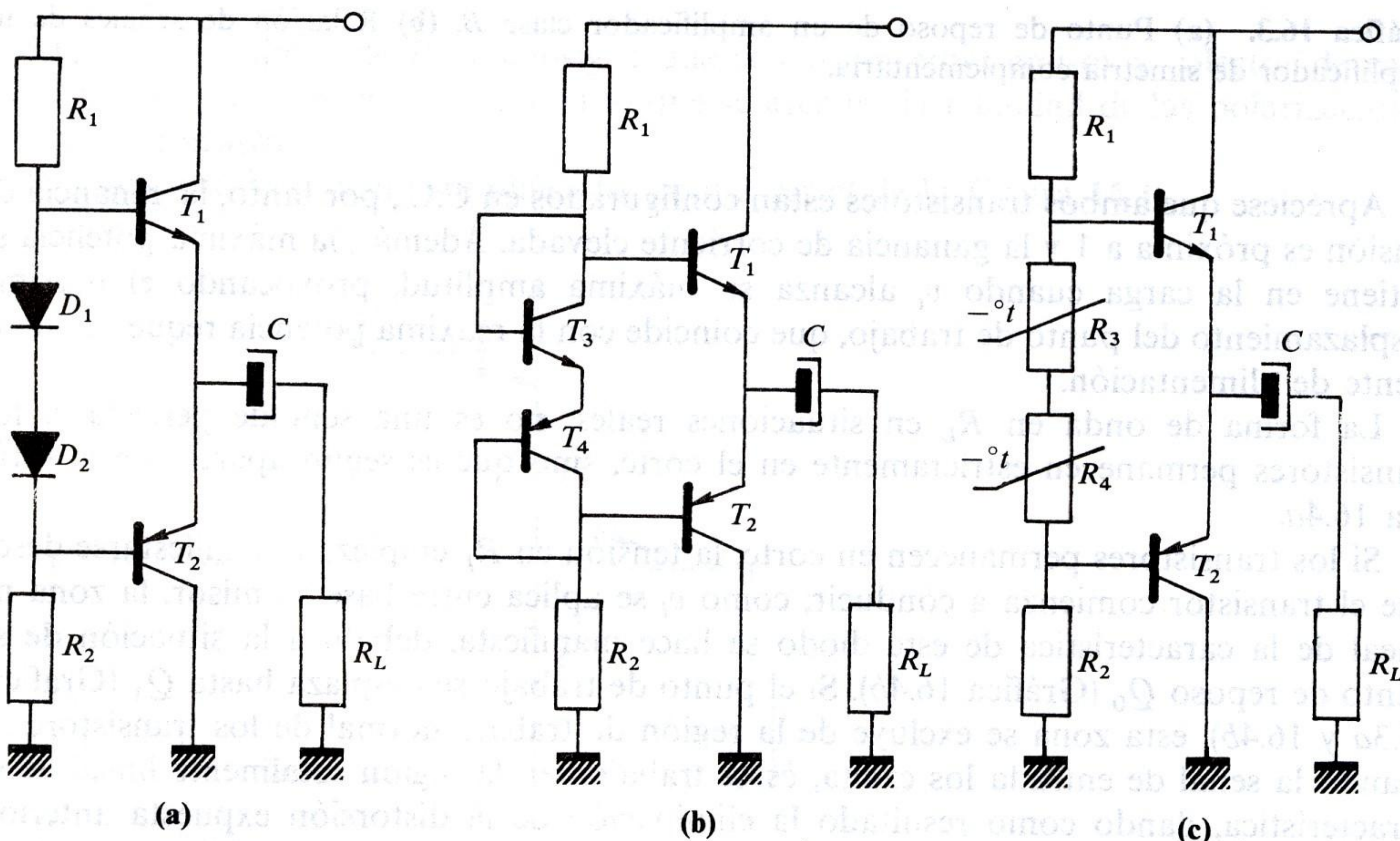


Figura 16.4. (a) Polarización con diodos. (b) Polarización con transistores empleados como diodos. (c) Polarización con NTC.

valor óhmico y estando P ajustado en su punto medio; dicho punto también estará a un potencial $V_{CC}/2$, pues $R_1 = R_2$. De esta forma, la tensión en las bases de T_1 y T_2 será ligeramente mayor y menor, respectivamente, que $V_{CC}/2$, quedando ambos diodos (base-emisor) ligeramente polarizados y evitando, por tanto, la distorsión de cruce.

La misión de R_3 y R_4 es la de conseguir la estabilidad térmica del circuito, ya que si por causas de la temperatura aumenta I_C , al aumentar la caída de tensión en dichas resistencias, se reduce la polarización efectiva base-emisor de los transistores; éste es el método más sencillo, pero no el más efectivo en lograr dicha estabilidad.

Para este cometido, son usuales circuitos como los de la Figura 16.4 que emplean respectivamente diodos, transistores y resistencias con coeficiente negativo de temperatura (NTC), para controlar las «carreras térmicas».

En los tres casos, estos componentes se colocan muy próximos a los transistores T_1 y T_2 , para que sean sensibles a sus cambios de temperatura y, así, poder controlar su corriente de colector, disminuyendo la polarización efectiva base-emisor.

■ Rendimiento del circuito

El amplificador de potencia en simetría complementaria presenta un excelente rendimiento, pues sin señal de entrada el circuito absorbe una corriente mínima y, cuando ésta está presente, la mayor parte de la potencia consumida es transferida a la carga.

La potencia absorbida de la fuente vendrá determinada por la corriente media en la carga y la tensión de alimentación V_{CC} (despreciando nuevamente la corriente absorbida por el divisor de polarización de bases R_1 , P y R_2), así,

$$P_{CC} = I_{R_L} \cdot V_{CC} = \frac{V_{CEQ}}{\pi R_L} \cdot V_{CC} = \frac{V_{CC}}{2\pi R_L} \cdot V_{CC} = \frac{V_{CC}^2}{2\pi R_L}$$

donde I_{R_L} es la intensidad media absorbida por la carga.

La máxima potencia disipada por la carga se presentará cuando la señal de entrada sea máxima y el punto de trabajo recorra toda la recta de carga, entonces

$$V_{R_L pp \text{ máx}} = V_{CC}$$

y

$$P_{L \text{ máx}} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L}$$

de donde

$$\eta = \frac{P_{L \text{ máx}}}{P_{CC}} \cdot 100 = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{2\pi R_L}} \cdot 100 = \frac{\pi}{4} \cdot 100 = 78,5 \%$$

Tabla 16.3. Condiciones de reposo del amplificador de simetría complementaria

I_{Reposo}	V_{CE1}	V_{BE1}	V_{E1}	V_{CE2}	V_{BE2}	V_{E2}

Tabla 16.4. Características del amplificador de simetría complementaria

I_{CC} (Intensidad de la fuente)	
I_{reposo} ($v_i = 0$)	
$v_{i\text{máx}}$	

(a)

v_i	v_o	A'_v	P_i	P_o	A'_p	η
		dB			dB	

(b)

CUESTIONES

1. Elegir razonadamente una etapa de potencia, para un amplificador que ha de ser alimentado a pilas.
2. ¿Qué resultados se obtendrían, empleando como amplificador de potencia en clase A, una configuración E.C. en lugar de C.C.?
3. Razonar si sería posible emplear pares Darlington, en lugar de transistores simples, en una etapa de potencia de simetría complementaria.
4. Realizar un cuadro resumen, con las ventajas e inconvenientes de cada tipo de amplificador de potencia de los estudiados.

CONCLUSIONES

- Un amplificador de potencia es aquel que, recibiendo una señal de amplitud de tensión suficiente, le aplica una elevada ganancia de corriente, capaz de gobernar cargas de baja impedancia.
- Las principales clases de amplificadores de potencia son A, AB, B y C, según la porción de señal de entrada que se manifieste a la salida.

- Los amplificadores clase *A* ofrecen un bajo rendimiento, sin embargo, son muy útiles por su sencillez para determinadas aplicaciones.
- Los amplificadores clase *B* tienen rendimientos elevados, pero necesitan dos transistores para ofrecer una señal de salida de forma igual a la de entrada.
- Los amplificadores clase *C* no encuentran aplicación en B.F.

INFORMACION ADICIONAL

Tabla 16.5. Transistor BD138

Material	Tipo	Cápsula	V_{CEO}	V_{CBO}	V_{EBO}	I_C	I_{CM}	P_{tot}	H_{FE}	$V_{CE(sat)}$
Silicio	<i>PNP</i>	TO-126	-60 V máx	-60 V máx	-5 V máx	-1,5 A máx	-2 A máx	8 W a 70 °C	40-250	500 mV máx $I_c = 0,5$ A