

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 gracia 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.

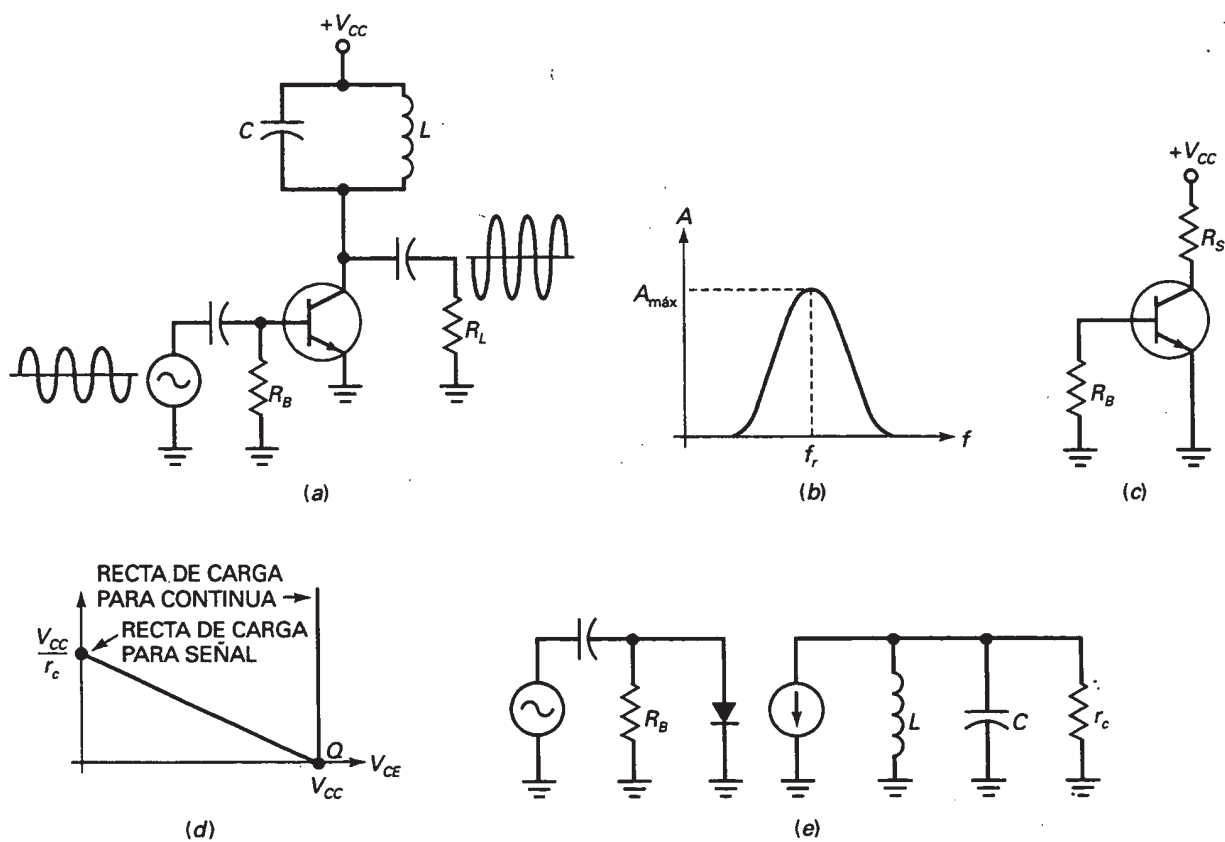


Figura 11-13. a) Amplificador sintonizado en clase C; b) ganancia de tensión frente a frecuencia; c) el circuito equivalente para continua está sin polarizar; d) dos rectas de carga; e) circuito equivalente para corriente alterna.

□ 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.

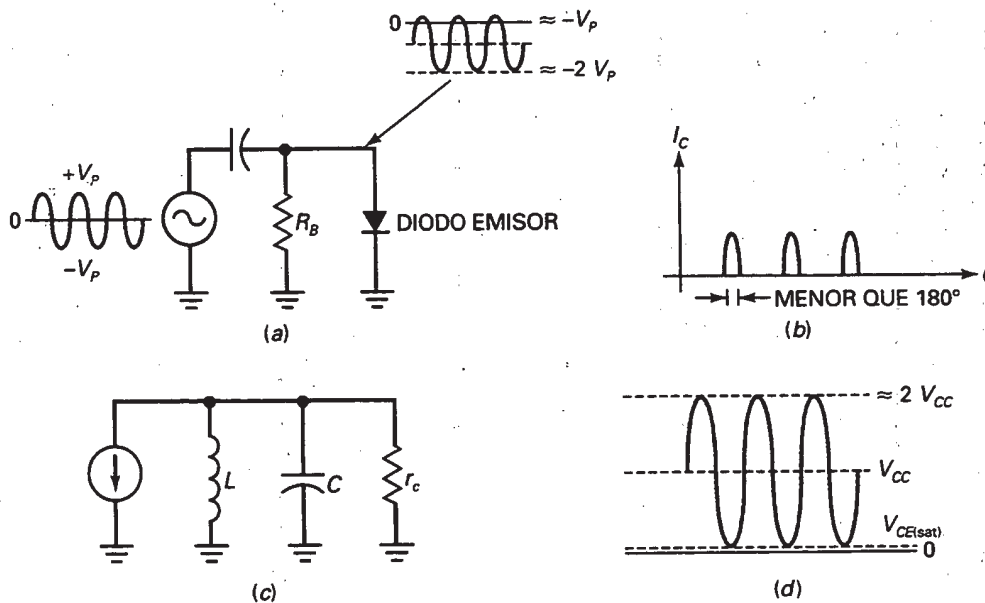


Figura 11-14. a) Señal de entrada desplazada negativamente en la base; b) la corriente de colector fluye en pulsos; c) circuito de colector de corriente alterna; d) onda de tensión en el colector.

□ 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 11-14*b* es rica en *armónicos*, múltiplos de la frecuencia de entrada. En otras palabras, los pulsos de la Figura 11-14*b* son equivalentes a un grupo de ondas tipo seno con frecuencias f , $2f$, $3f$, ..., nf .

El circuito resonante de la Figura 11-14*c* 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 11-14*d*. 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

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.1\mu\text{H})(470\text{pF})}} = 5.19\text{MHz}$$

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.

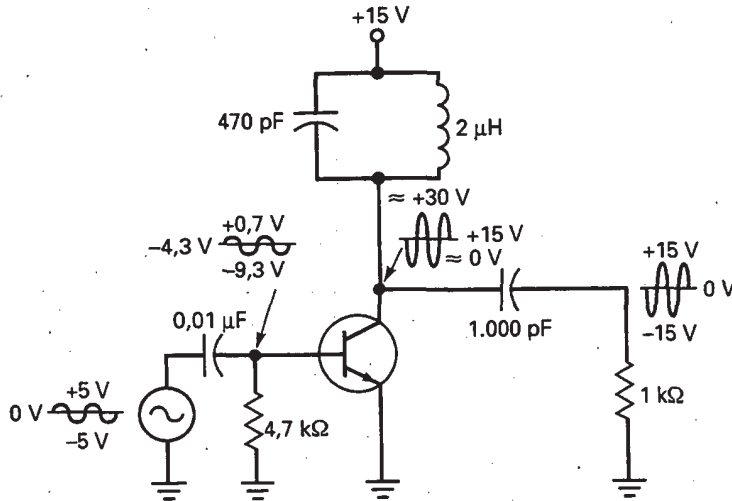


Figura 11-15. Ejemplo.

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:

$$G = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (\text{ganancia de potencia})$$

$$P_{\text{out}} = \frac{v_{\text{out}}^2}{8R_L} \quad (\text{potencia de salida para alterna})$$

$$P_{\text{out(máx)}} = \frac{\text{MPP}^2}{8R_L} \quad (\text{máxima potencia de salida para alterna})$$

$$P_{\text{dc}} = V_{\text{CC}}I_{\text{dc}} \quad (\text{potencia de entrada para corriente continua})$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{dc}}} \times 100 \% \quad (\text{rendimiento})$$

□ 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.

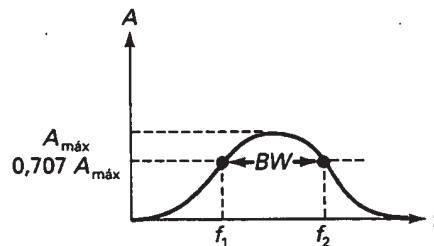


Figura 11-16. Ancho de banda.

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.

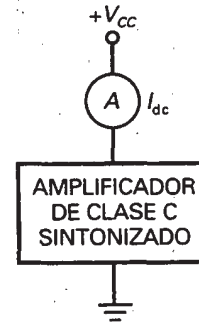


Figura 11-17. La corriente disminuye en la frecuencia de resonancia.

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:

$$Q_L = \frac{X_L}{R_s} \tag{11-17}$$

- 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:

$$R_p = Q_L X_L \tag{11-18}$$

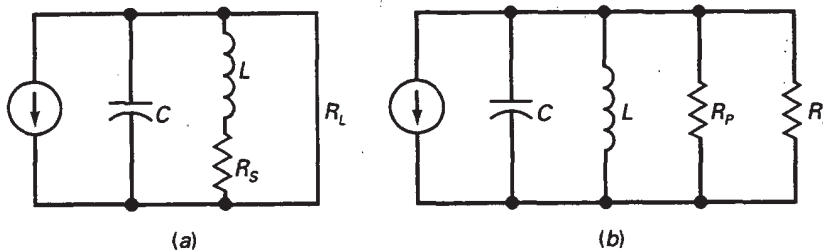


Figura 11-18. a) Resistencia serie equivalente para la autoinducción; b) resistencia paralelo equivalente para la autoinducción.

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 \bar{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 $0,2 \mu\text{s}$ y un período de $1,6 \mu\text{s}$, el ciclo el trabajo es:

$$D = \frac{0,2 \mu\text{s}}{1,6 \mu\text{s}} = 0,125$$

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_{CE0} 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° .

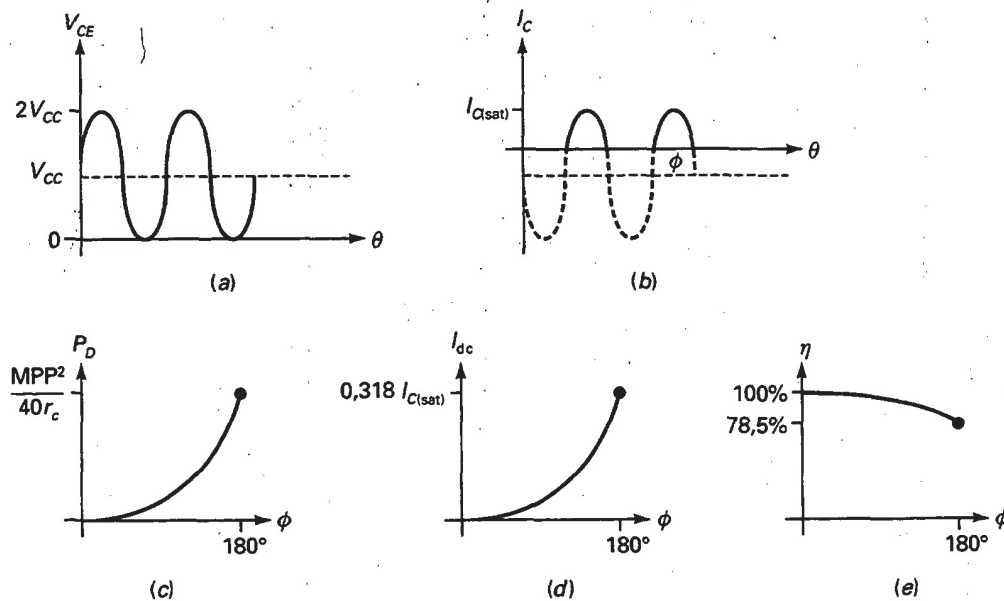


Figura 11-20. a) Salida máxima; b) ángulo de conducción; c) disipación de potencia en el transistor; d) consumo de corriente; e) rendimiento.

Fíjese en que la corriente de colector alcanza un valor máximo en $I_{C(\text{sat})}$. El transistor debe 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 $I_{C(\text{sat})}/\pi$. 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_c vale 100 en la Figura 11-21, ¿cuál es el ancho de banda del amplificador?

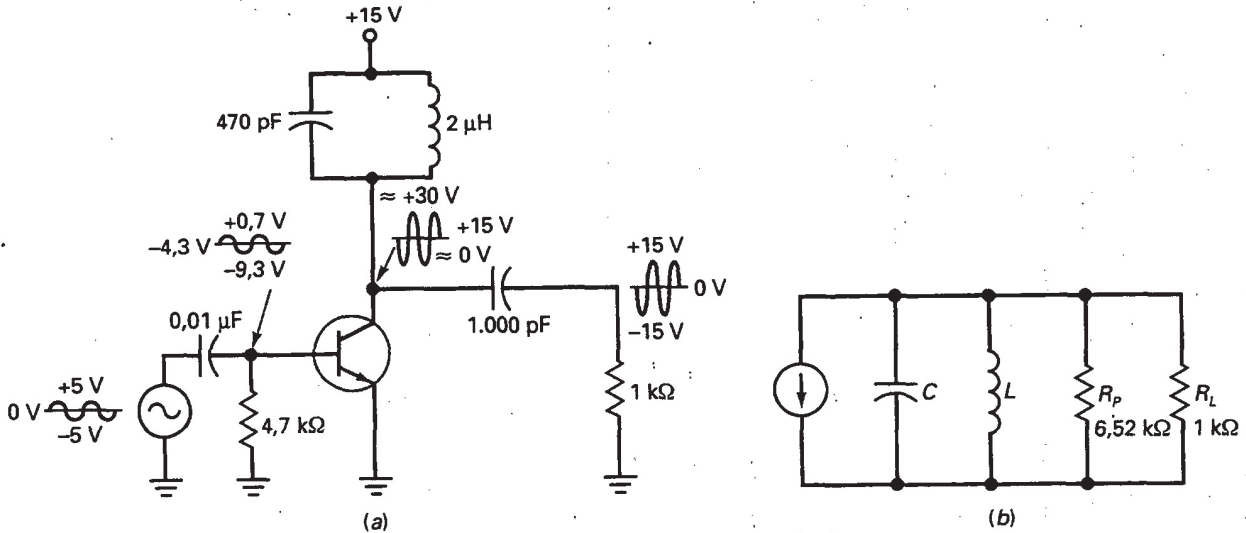


Figura 11-21. Ejemplo.

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:

$$R_p = Q X_L = (100)(65.2 \Omega) = 867 \Omega$$

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:

$$MPP = 2V_{cc} = 2(15\text{ V}) = 30\text{ V}_{pp}$$

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