

Cap. 10.- Transmisores de radio – Amplificadores de potencia

Un transmisor de radio toma la información que va a comunicarse y la convierte en una señal electrónica compatible con el medio de comunicaciones. Este proceso suele incluir la generación de una portadora, la modulación y la amplificación. La señal se lleva después por conductor simple, cable coaxial o guía de onda, a una antena que la difunde por el espacio libre. En este capítulo se analizan los circuitos más comunes en transmisores de radio. Estos equipos incluyen amplificadores, multiplicadores de frecuencia, redes de acoplamiento de impedancias y circuitos de procesamiento de voz.

En los primeros transmisores se usaba un explosor conectado directamente a la antena. El único "circuito sintonizado" era la misma antena.

No es necesario decir que el ancho de banda de tal transmisor era en verdad enorme. Se parecía más a la interferencia del encendido de un automóvil que a cualquier señal de radio que se transmite actualmente. De hecho, el consenso en los primeros días de la radio, hasta casi el inicio del siglo XX, era que sólo podía recibirse una señal en una zona determinada. En otras palabras, se desconocía la multiplexación por división de frecuencia.

El siguiente paso fue conectar uno o más circuitos sintonizados entre el explosor y la antena. El nombre original para esta idea fue "sintonía". Esto reducía en gran medida el ancho de banda y permitía la posibilidad de transmitir más de una señal en la misma zona en diferentes frecuencias.

Los transmisores con explosores se volvieron más y más complejos, tenían varios espacios interelectrónicos, algunos de ellos giratorios, suministro de *ac* y sistemas de sintonización con muchos detalles, hasta que con el tiempo los reemplazaron los tubos al vacío (bulbos).

Los transmisores van desde los juguetes sin licencia que generan sólo alguna milésima de watt, hasta los transmisores de radio-difusión de onda corta con potencias de salida del orden de megavatios. Sin embargo, a pesar de la gran variación en la potencia de salida, apariencia física y tipo de modulación, los transmisores tienen sólo unas configuraciones básicas. En un capítulo tan breve como es éste no pueden proporcionarse detalles de todos los tipos de transmisores, pero sí puede proporcionar una idea de los principios del diseño de éstos, lo cual es útil para que el estudiante entienda los modelos específicos de transmisores cuando se los encuentre.

Requisitos del transmisor

Antes de examinar los circuitos reales es necesario considerar lo que un transmisor tiene que hacer. Debe generar una señal con el tipo correcto de modulación, con suficiente potencia, en la frecuencia portadora correcta y con razonable eficiencia. La señal de salida tiene que estar acoplada a una antena. La modulación debe hacerse con la suficiente exactitud de tal manera que señal en banda base, cuando la recupere un receptor, sea una copia razonablemente fiel de la señal modulante original.

Exactitud y estabilidad de la frecuencia

EJEMPLO 10.1 Un oscilador de cristal es exacto en un 0.0005%. ¿Qué tanto puede alejarse la frecuencia de salida a 27 MHz?

Solución: La frecuencia puede desviarse por 0.0005% de 27MHz, lo cual es

$$27 \times 10^6 \text{ Hz} \times \frac{0.0005}{100} = 135 \text{ Hz}$$

Pureza espectral

Todos los transmisores generan señales espurias, es decir, emiten señales a frecuencias distintas a las de la portadora y las bandas laterales requeridas para el esquema de modulación en uso. A menudo, las señales espurias son armónicas de la frecuencia de operación o del oscilador de la portadora, si éste opera a una frecuencia diferente. Cualquier amplificador produce distorsión armónica. Los amplificadores Clase de C, que son muy comunes en los transmisores, producen una gran cantidad de energía en armónicas. Todas las frecuencias, excepto la frecuencia asignada para la transmisión, deben ser filtradas para evitar interferencia con otras transmisiones.

El filtrado de armónicas nunca es perfecto, naturalmente, pero en los transmisores modernos muy bien diseñados es muy efectiva. Por ejemplo, en la figura 10.1 se ilustra el espectro que produce un transmisor de CB típico. Observe la frecuencia fundamental a casi 27 MHz y las armónicas a dos y tres veces la frecuencia fundamental. ¿Qué tan abajo de la frecuencia fundamental están estas emisiones de armónicas en cuanto a amplitud o intensidad?

Potencia de salida

Hay diversas maneras de medir la potencia del transmisor, que dependen del esquema de modulación. Los transmisores para AM de

portadora completa se clasifican en términos de potencia de la portadora. Se entiende que la potencia de salida con modulación es mayor que ésta. Las clasificación en términos de la potencia de la portadora es inútil con transmisores de AM con portadora suprimida, y entonces, se usa la potencia de envolvente pico Peak-envelope Power (PEP). La modulación de la frecuencia es un sistema de potencia constante, y entonces, los transmisores FM se clasifican según la salida total de potencia.

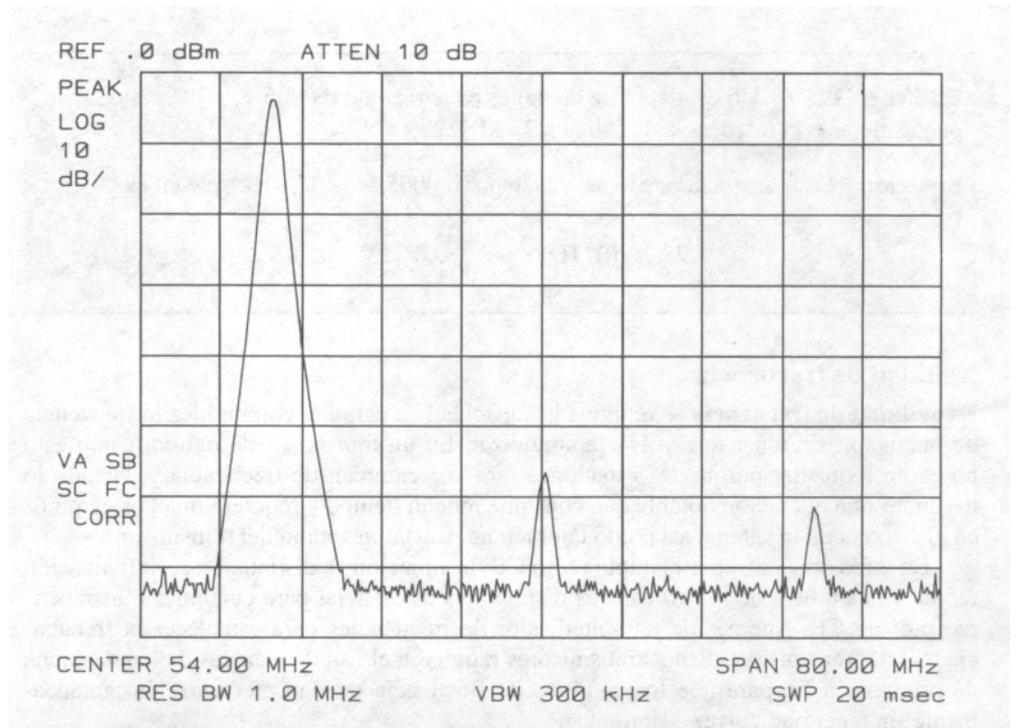


Figura 10.1.- Analizador de espectro

En ocasiones, la potencia que entrega la fuente de energía en la etapa de salida del transmisor, se usa en lugar de la potencia de salida porque la primera es más fácil de medir. Como no hay una correlación simple entre la potencia suministrada y la potencia de salida, debido a que la eficiencia de los amplificadores de potencia del transmisor varía ampliamente, este método se usa muy pocas veces.

Cuando se prueba un transmisor de comunicaciones, el ingeniero debe estar atento al **factor de trabajo** nominal del transmisor. Muchos transmisores diseñados para comunicaciones de voz por dos vías no están especificados para trabajar en forma continua a toda su potencia, puesto que se supone que el operador habla normalmente menos de la mitad del tiempo y quizá sólo por unos pocos segundos a un minuto cada vez. Esto se olvida fácilmente al hacer las pruebas, y el resultado puede ser el sobrecalentamiento de transistores u otros componentes. Los transmisores de radiodifusión sí pueden operar en forma continua (24 horas por día a toda su potencia).

Eficiencia

La eficiencia de un transmisor es importante por dos razones. La más obvia es la *conservación de la energía*. Esto es importante en particular cuando se requieren niveles de potencia muy grandes, como en la radiodifusión o, en el otro extremo del intervalo de niveles de potencia, cuando es necesaria la operación con aparatos de mano usando baterías. Es evidente otra razón para alcanzar alta eficiencia cuando se considera lo que sucede con la potencia que entra al transmisor desde la fuente de alimentación de ésta, pero que no sale por la antena: se convierte en calor en el transmisor, y este calor tiene que ser disipado. Las grandes cantidades de calor necesitan componentes grandes: sumideros térmicos, ventiladores y, en el caso de algunos transmisores de alta potencia, hasta enfriamiento con agua. Todo esto se añade al costo del equipo.

Cuando se analiza la eficiencia es importante distinguir entre la eficiencia de una sola etapa y la del transmisor completo. Conocer la eficiencia de una etapa del amplificador es útil para diseñar los sistemas de enfriamiento y dimensionar las fuentes de alimentación. Por otro lado, al calcular los costos de energía lo que importa es la **eficiencia global** del sistema. La eficiencia global es la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada desde una fuente de alimentación primaria, ya sea la línea nominal de *ca* o una batería. La eficiencia global se reduce por factores como la potencia para el filamento calentador del tubo al vacío y las pérdidas en la fuente de alimentación.

Fidelidad de la modulación

Como se mencionó anteriormente, un sistema de comunicaciones ideal permite que la señal de información original se recupere exactamente, excepto por un tiempo de retraso. Es probable que permanezca cualquier distorsión introducida en el transmisor; en la mayoría de los casos, no es posible eliminarla en el receptor. Entonces, podría esperarse que un transmisor fuera capaz de modular cualquier frecuencia de banda base en la portadora, en cualquier nivel de modulación, para conservar la señal de información tanto como sea posible. En la práctica, el espectro de banda base a menudo tiene que restringirse con la finalidad de mantener el ancho de banda de transmisión dentro de los límites legales.

Además, se usa con frecuencia una forma de **compresión**, en la cual las señales en banda base de bajo nivel se amplifican más que las señales de alto nivel, para conservar alto el porcentaje de modulación. La compresión distorsiona la señal original al reducir el rango dinámico (dynamic range) **margen de amplitudes**, que es la razón entre el nivel de la variación más fuerte y el de la más silenciosa en la señal de audio. El resultado es una relación señal a ruido mejorada en el receptor a costa de alguna distorsión.

El efecto de la compresión sobre el rango dinámico se elimina mediante la aplicación de una expansión igual y opuesta en el receptor. Para esta expansión se requiere dar más ganancia a las señales de alto nivel. Las combinaciones compresión—expansión son muy comunes en los sistemas de comunicación.

En los transmisores para comunicaciones se tiende a usar un relativamente simple circuito de control **automático de nivel** (automatic-level-control circuit) ALC que mantiene (tanto como sea posible) la modulación en nivel que se aproxima, pero nunca excede al 100%. El resultado es una gran reducción del rango dinámico, lo cual no afecta la inteligibilidad de la voz. En los transmisores de radiodifusión, por otro lado, se usan procesadores muy complejos que aplican cantidades variables de compresión a diferentes intervalos de frecuencia. Se establecen con mucho cuidado hasta alcanzar el mejor acomodo entre la música con sonido natural y una buena relación señal a ruido (lo cual también significa un aumento en el intervalo del transmisor).

Otras clases de distorsión, como la distorsión armónica y la distorsión por inter-modulación, también tienen que mantenerse dentro de límites razonables. Como podría esperarse, los niveles bajos de distorsión son más importantes en el servicio de radiodifusión que en el servicio de radio móvil.

10-1 Introducción a los transmisores

El transmisor es la unidad electrónica que toma la señal de información que se envía, y la convierte en una señal de RF que puede transmitirse a través de grandes distancias. Todo transmisor tiene tres funciones básicas. *Primera*, debe generar una señal de la frecuencia correcta en un punto deseado del espectro. *Segunda*, debe proporcionar cierta forma de modulación para que la señal de información modifique la señal de la portadora. *Tercera*, debe efectuar la amplificación de potencia suficiente para asegurar que el nivel de la señal sea lo bastante alto para que recorra eficazmente la distancia deseada.

Configuraciones de transmisores

En la figura 10.2 se ilustran los diagramas a bloques de algunos transmisores representativos. Los transmisores reales son de una variedad infinita, pero la mayoría son variaciones de estas estructuras. Aquí estudiaremos algunas de las variaciones y las razones de ellas a medida que se avance en el capítulo, así como en otros capítulos en los que se tratan sistemas particulares más detalladamente.

En un examen de conjunto de la figura 10.2 se observa que en todos los casos se genera y se transmite una señal modulada de radiofrecuencia (RF). En la figura 10.2(a), la cual representa un transmisor característico AM, de portadora completa, un sintetizador de frecuencias genera a la portadora y luego es amplificada a su potencia de salida completa antes que la modulación tenga lugar. Se usaría el multiplicador de frecuencias optativo, si la frecuencia requerida de portadora fuera más alta que lo que puede generar en forma adecuada el sintetizador.

Transmisor de CW

La forma más simple de transmisor es el oscilador que muestra la figura 10-3. El oscilador genera una señal portadora con la frecuencia deseada. La frecuencia aquí está determinada por un cristal. La información que se transmite se expresa en una forma especial de código que utiliza puntos y rayas para representar las letras del alfabeto y los números. La información transmitida de esta manera se conoce como transmisión de onda continua (CW, continuous wave). En el emisor se utiliza una llave conveniente, que es un interruptor operado en forma manual para encender y apagar el oscilador a fin de producir los puntos y rayas. El oscilador produce un breve pulso de energía de RF para un punto y un pulso de RF más prolongado para una raya. Aun cuando un transmisor tan simple como éste puede tener una potencia de 1 W o menos, a la frecuencia correcta y con una buena antena es capaz de enviar señales a la mitad del alcance mundial (en HF). El transmisor de CW básico ya descrito puede mejorar en forma considerable agregando un amplificador de potencia. El resultado se muestra en la figura 10-4.

El oscilador se controla con la llave para producir puntos y rayas, pero el amplificador incrementa el nivel de potencia de la señal. El resultado es una señal más intensa que tendrá un alcance mayor y producirá comunicaciones más confiables.

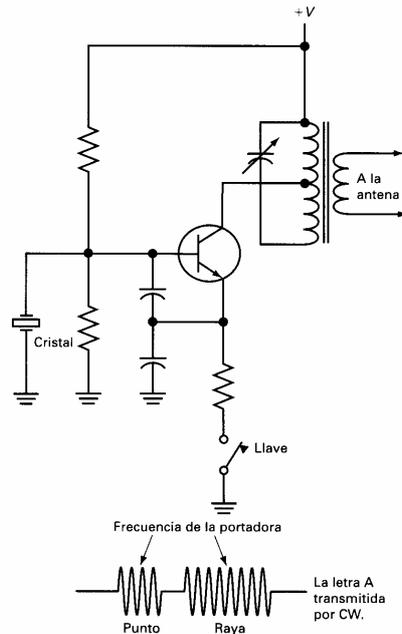


Figura 10-3 El transmisor más simple, un oscilador de CW.

La combinación básica oscilador-amplificador que ilustra la figura 10-2 es la base de casi todos los transmisores de radio. Según el tipo de modulación que se use, el nivel de potencia y otras consideraciones se agregan muchos otros circuitos. Los siguientes son algunos de los transmisores que emplean varios tipos de modulación.

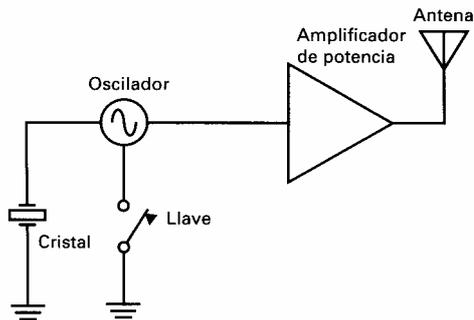


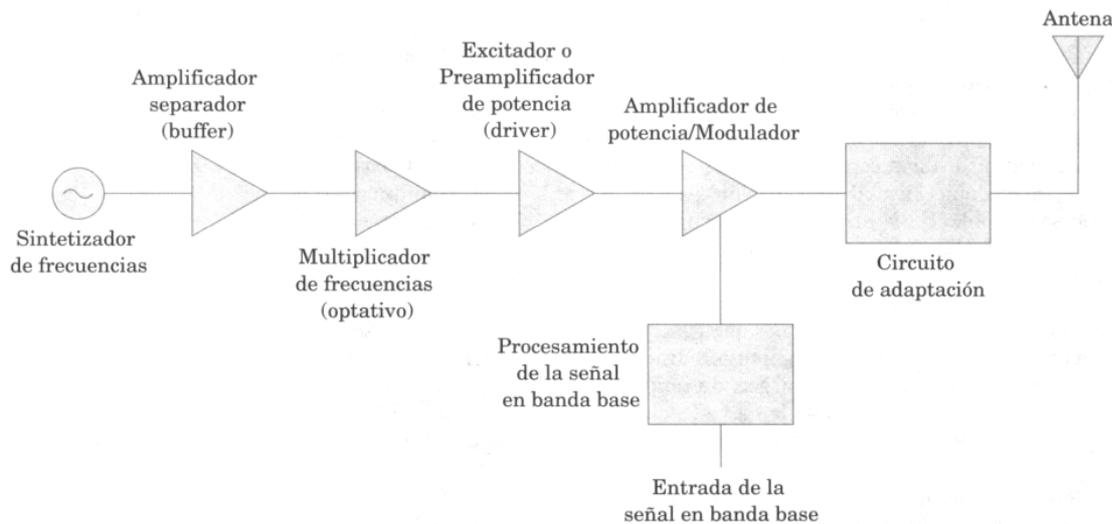
Figura 10-4 Transmisor de CW con mayor potencia.

Transmisor de AM

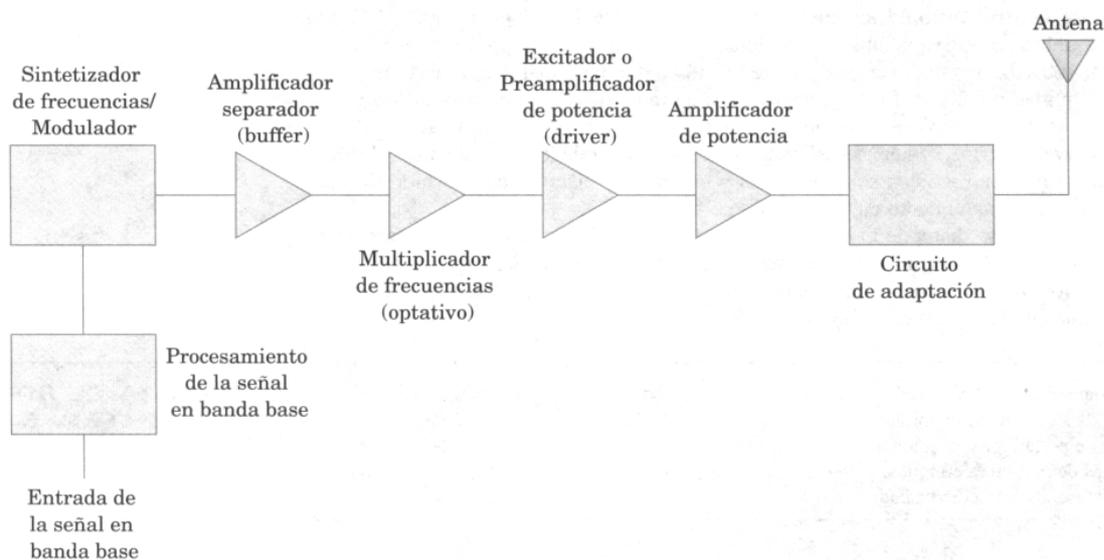
La figura 10-5 muestra un transmisor de AM, en el que un oscilador genera la frecuencia de la portadora final. En la mayoría de las aplicaciones se trata de un oscilador a cristal. En general, los transmisores operan con frecuencias o canales asignados y los cristales proporcionan la mejor forma de obtener la frecuencia deseada con buena estabilidad. Por lo común, los osciladores LC no tienen la estabilidad de frecuencia requerida

para mantenerse en frecuencia. Las variaciones de temperatura y otras condiciones hacen que la frecuencia salga de los límites que impone la CNC. La señal de la portadora se envía a un amplificador de aislamiento (buffer) cuya finalidad principal es aislar el oscilador de las demás etapas de amplificación de potencia. Dicho amplificador de aislamiento por lo general opera en clase A y proporciona un incremento modesto en la potencia de salida. El propósito principal de ese amplificador es impedir que los cambios en la carga ocasionen variaciones de frecuencia en el oscilador. La señal del amplificador de aislamiento (buffer) se aplica al amplificador de excitación. Éste es un amplificador clase C diseñado para proporcionar un nivel intermedio de amplificación de potencia. La finalidad de este circuito es generar suficiente potencia de salida para alimentar la etapa de amplificación de potencia final. El amplificador de potencia final, que se conoce simplemente como el final, también opera en clase C con potencia muy alta. La cantidad de potencia real depende de la aplicación; por ejemplo, en un transmisor de CB, la potencia de entrada es de sólo 5 W Sin embargo, las radiodifusoras de AM operan con potencias mucho más altas, de 250, 500, 1000, 5 000 o 100 000 W.

Todos los circuitos de RF del transmisor por lo común son de estado sólido; es decir, se implementan con transistores bipolares o de efecto de campo. Aun cuando los transistores bipolares son con mucho los más comunes, los MOSFET se usan más ya que ahora tienen capacidad para manejar alta potencia.



(a) Modulación de alto nivel (AM)



(b) Modulación de bajo nivel de sintetizador (FM, FSK)

Figura 10.2 Configuraciones de los transmisores

Al retrasar la modulación tanto como sea posible, esta configuración permite que todas las etapas del amplificador de RF en el transmisor operen en un modo no lineal para lograr una eficiencia mayor. Como AM depende de las variaciones de la amplitud, los amplificadores lineales deben usarse después que tiene lugar la modulación. Es relativamente fácil construir los moduladores de AM de alta potencia, por lo que ésta es la configuración preferida para AM.

Cuando la modulación significa cambiar la frecuencia transmitida, como en FM, es común modular el oscilador de portadora. En la figura 10.2(b), el oscilador mostrado es un sintetizador de frecuencias. El multiplicador de frecuencias optativo multiplicaría la desviación de la frecuencia, así como la frecuencia de la portadora, por lo que sería útil en caso de que el oscilador modulado no alcanzara la desviación requerida.

Un filtro pasabanda elimina los componentes indeseables de la mezcla, y envía la señal a una cadena de amplificadores. En los transmisores de AM de portadora suprimida se usa por lo regular esta configuración; también es común para todos los tipos de transmisores de UHF y de frecuencia superiores.

Los diseños de los tres transmisores terminan con un amplificador de varias etapas. Se muestran dos etapas: el excitador o preamplificador de potencia (driver) y el amplificador de potencia. Podrían necesitarse más, sobre todo para niveles altos de potencia de salida. El circuito de adaptación acopla el amplificador de potencia a la impedancia de carga, la cual es casi siempre 50 o 75Ω , y también elimina armónicas y otras señales espurias de la salida del transmisor.

El amplificador de potencia debe ser lineal para cualquier señal que tenga amplitud variable, a menos que, como en la figura 10.2(a), la modulación se haga en la salida del transmisor.

Ahora que ya se examinaron brevemente las tecnologías básicas los transmisores, se tratarán más detalladamente los transmisores para los esquemas de modulación que se han estudiado hasta ahora.

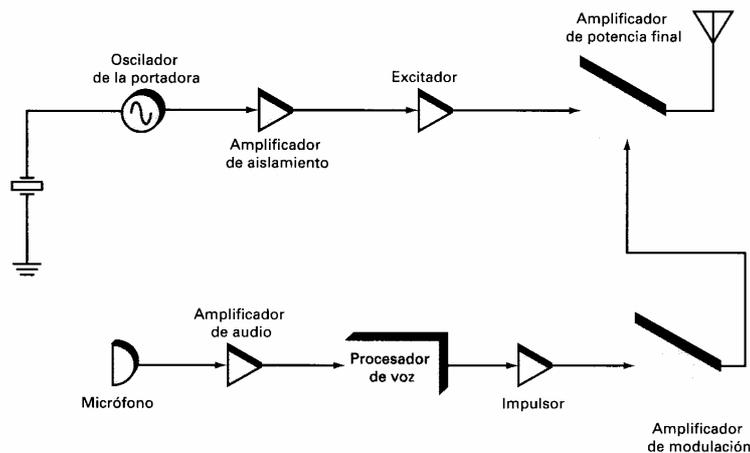


Figura 10-5 Transmisor de AM que utiliza modulación de alto nivel en el colector.

Los transistores a menudo también se emplean en el amplificador final, **siempre que el nivel de potencia no exceda de varios cientos de watts**. Los transistores de potencia de RF individuales pueden manejar hasta 300 W. Estos transistores se pueden conectar en paralelo o en configuraciones en contrafase (push-pull) para incrementar aún más la ca-

pacidad de manejo de potencia. Sin embargo, en los amplificadores finales rara vez se usan transistores, si la salida de potencia excede los 5 000 W. Para niveles de potencia más altos todavía se usan tubos al vacío.

Consideremos que la figura 10-5 es un transmisor de voz. La entrada del micrófono se conecta a un amplificador de audio clase A de bajo nivel, el cual refuerza la señal pequeña del micrófono a un nivel de voltaje más alto; se pueden usar una o más etapas de amplificación.

La señal de voz se envía a alguna forma de circuito de procesamiento de voz. "Procesamiento de voz" se refiere al filtrado y control de amplitud. El filtrado asegura que las frecuencias de voz sólo se dejan pasar en determinado intervalo, lo que permite minimizar el ancho de banda que ocupa la señal. La mayoría de los transmisores de comunicaciones limitan la frecuencia de voz al intervalo de 300 Hz a 3 000 Hz, que es el adecuado para comunicaciones inteligibles. Sin embargo, las radiodifusoras de AM ofrecen una fidelidad más alta y permiten frecuencias hasta de 5 kHz.

El procesador de voz también consta de alguna clase de circuito para mantener la amplitud en un nivel particular. Las señales de amplitud de alto nivel se comprimen y a las señales de nivel más bajo suele dárseles más amplificación; el resultado es que se impide la sobremodulación. Así se reduce la posibilidad de distorsión de la señal y las armónicas que producen bandas laterales más anchas que pueden causar interferencia al canal adyacente. (*Compañeros*)

Después del procesador de voz se usa un amplificador de excitación. Este elemento incrementa el nivel de potencia de la señal para que tenga la capacidad de alimentar el amplificador de modulación de alta potencia. En el transmisor de AM de la figura 10-5 se usa modulación de alto nivel o de colector. Como ya se mencionó, la potencia de salida del amplificador de modulación debe ser la mitad de la potencia de entrada del amplificador de RF. El amplificador de modulación de alta potencia en general opera en clase AB o en clase B en push-pull para alcanzar estos niveles de potencia.

Todas las etapas de un transmisor (excepto el amplificador de potencia y quizá el preamplificador de potencia) operan a bajos niveles de potencia y son similares a los circuitos tratados en el capítulo de AM. Con frecuencia, esta parte del transmisor, exclusiva de las etapas que manejan la potencia, se llama excitador.

Etapa del oscilador

Para que un diseño moderno de un transmisor tenga buena estabilidad se requiere un oscilador controlado por cristal. Donde se necesita una operación de frecuencia variable, lo común es utilizar un sintetizador de frecuencias sincronizado con un oscilador maestro controlado por cristal.

Las etapas del multiplicador y del amplificador separador (buffer)

Cualquiera que sea el tipo de oscilador o sintetizador que se utilice para generar la frecuencia de operación, éste debe estar aislado de cualquier cambio en la impedancia de la carga, con la finalidad de conservar una buena estabilidad. La etapa del separador (buffer) lo consigue. En los diseños modernos es probable que sea un amplificador de banda ancha para que se reduzcan los ajustes cuando cambia la frecuencia. Esta etapa opera a potencia baja, donde la eficiencia es menos importante que la pureza del espectro, así que es probable que funcione como Clase A.

Por otro lado, se requieren las etapas del multiplicador para que generen armónicas como parte de su diseño. Operarán en Clase C para que haya la seguridad de que así sucede; los circuitos sintonizados de salida están diseñados para pasar la frecuencia deseada y atenuar las señales espurias.

La etapa del preamplificador de potencia o excitador (driver)

De acuerdo con la potencia de salida del transmisor, la etapa en que se amplifica la potencia podría necesitar gran potencia en su entrada. Por ejemplo, si el amplificador de potencia de un transmisor de 10 kW tiene una ganancia de potencia de 20 dB, requiere una potencia de entrada de 100 W. Para esto es necesario un amplificador de potencia, probablemente que funcione en Clase C para excitar la etapa final. Este paso se podría designar como el amplificador de potencia intermedio (intermediate power amplifier (IPA)).

El amplificador/módulador de potencia

En transmisores pequeños, es probable que se use un transistor único que funcione en la Clase C en el amplificador de potencia, con modulación del colector alcanzada por medio de un amplificador de audio tipo par complementario (push-pull) de Clase AB. Para potencias muy por arriba de 100W se necesita usar más de un transistor de salida. Conectar simplemente los transistores en paralelo no sirve, ya que las capacitancias internas se suman y alcanzan niveles inaceptables. En forma correspondiente es necesario usar varios amplificadores completos cuya potencia de salida se combine antes de ser entregada a la antena. Otra opción que es todavía más usada en transmisores de alta potencia es utilizar tubos al vacío en el amplificador de potencia, amplificador modulador y, algunas veces, en la etapa del preamplificador de potencia o excitador.

En la figura 10.6 se ilustra un circuito simplificado para el amplificador de potencia con modulador de un transmisor AM de potencia reducida. Se basa en el amplificador

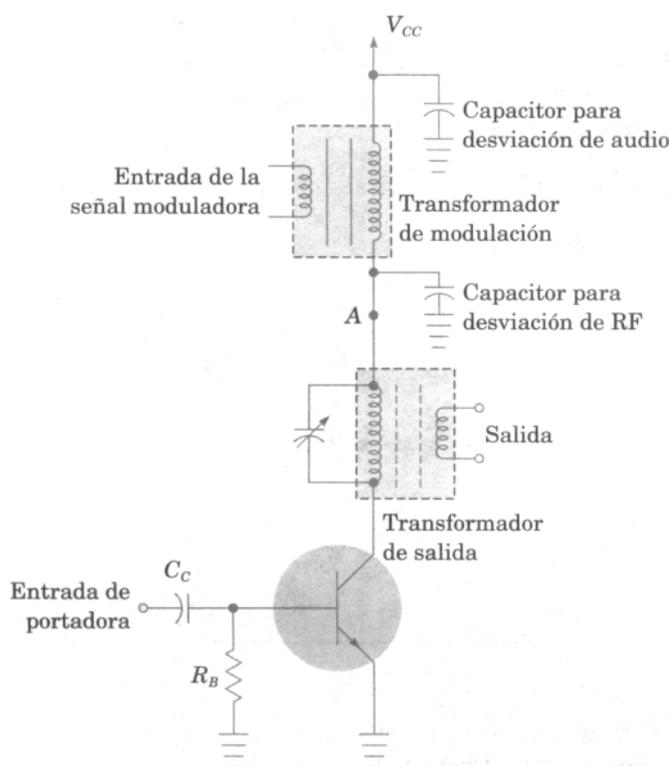


Figura 10.6 . Amplificador modulador Clase C

Clase C del capítulo de AM. La diferencia esencial es que la señal modulante se usa para variar el voltaje de alimentación del colector. El camino más directo para hacerlo, aunque ciertamente no es el único, es usar un transformador. El uso de un transformador también proporciona un medio para transformar la impedancia de carga óptima del amplificador de audio en la impedancia de la etapa modulante. Idealmente, para una modulación de 100%, el voltaje en el punto A, el lado del transistor del secundario del transformador de modulación, varía entre cero y el doble del voltaje de alimentación, V_{cc} .

El voltaje de alimentación de potencia no cambia con la modulación (siempre que la fuente de alimentación esté diseñada en forma adecuada) y tampoco la corriente promedio del colector. De hecho, un miliamperímetro en el conductor de alimentación del colector no debe mostrar

ningún cambio en la lectura, ya que las variaciones con la modulación son demasiado rápidas para que el medidor las siga. Entonces, la potencia que se recibe en forma directa de la fuente de alimentación para el amplificador final no cambia, al parecer, con la modulación.

La teoría básica de AM dice que la modulación incrementará la potencia de salida del amplificador en 50% para una modulación de 100%. Por lo tanto, la potencia de entrada tendrá que aumentar en el mismo porcentaje. ¿De dónde proviene la potencia extra si no lo hace directamente de la fuente de alimentación? Sólo hay otra única fuente posible, que es el amplificador modulador; en este caso se supone que es un amplificador de audio. Es evidente que este amplificador tendrá que proporcionar 50% de la entrada de potencia de portadora de de al amplificador final, es decir,

$$P_a = 0.5 P_s$$

donde P_a = potencia requerida del amplificador de audio

P_s = potencia de entrada de de para el amplificador final desde la fuente de alimentación

EJEMPLO 10.2 Un transmisor tiene una salida de potencia de portadora de 10 W con una eficiencia de 70%. ¿Cuánta energía debe suministrar el amplificador modulador para una modulación de 100%?

Solución: La entrada de energía de de al amplificador se determina a partir de

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_o}{P_s} \\ P_s &= \frac{P_o}{\eta} \\ &= \frac{10}{0.7} \\ &= 14.3 \text{ W}\end{aligned}$$

La potencia de audio requerida es

$$\begin{aligned}P_a &= 0.5P_s \\ &= 7.14 \text{ W}\end{aligned}$$

Es fácil calcular la impedancia de la etapa del modulador vista desde el secundario del transformador. Para una modulación de 100%, de la ecuación (5.1) ya se sabe que

$$P_a = 0.5P_s$$

PS es justo la energía de de la alimentación, entonces

$$P_s = V_{CC}I_c$$

donde V_{CC} = voltaje de la fuente de alimentación

I_c = corriente promedio del colector

Por lo tanto,

$$P_a = 0.5V_{CC}I_c$$

Para una modulación de 100%, también se sabe que el voltaje proveniente del amplificador modulador, cuando se añade al voltaje de la fuente, debe ser capaz de reducirlo a cero en un pico o máximo y duplicarlo en el otro. En otras palabras, en el secundario del transformador

$$V_{a(pk)} = V_{CC}$$

donde V_a = voltaje de audio medido a través del secundario del transformador de modulación

Si se supone que la señal moduladora es un senoide,

$$V_a(RMS) = \frac{V_{a(pk)}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{cc}}{\sqrt{2}}$$

Ahora, sea Z_a la impedancia del amplificador de potencia vista desde el secundario del transformador de modulación; al usar la ecuación de potencia para el voltaje RMS y la impedancia se tiene

$$P = \frac{V^2}{Z}$$

que al reacomodarla da

$$Z = \frac{V^2}{P}$$

$$Z_a = \frac{V_{a(RMS)}^2}{P_a}$$

$$= \frac{\left(\frac{V_{CC}}{\sqrt{2}}\right)^2}{0.5V_{CC}I_c}$$

$$= \frac{0.5V_{CC}^2}{0.5V_{CC}I_c}$$

$$= \frac{V_{CC}}{I_c}$$

EJEMPLO 10.3 Un transmisor opera con una fuente de alimentación de 12V, con una corriente en el colector de 2 A. El transformador de modulación tiene una razón de vueltas de 4:1. ¿Cuál es la impedancia de carga observada en el amplificador de audio?

Solución A partir de la ecuación de Z_c , la impedancia en el secundario del transformador es

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{V_{CC}}{I_c} \\ &= \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ A}} \\ &= 6 \Omega \end{aligned}$$

Esta impedancia se multiplica por el cuadrado de la razón de vueltas en el transformador. Si la impedancia del primario es Z_p , entonces

$$\begin{aligned} Z_p &= Z_a \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \\ &= (6 \Omega)(4^2) \\ &= 96 \Omega \end{aligned}$$

Como se mencionó antes, el voltaje del colector, en un amplificador no modulador Clase C, tiene la capacidad de variar entre casi cero (el "casi" se debe al hecho de que hay un voltaje pequeño, casi siempre menor de 1 V, en el transistor cuando éste se satura) y el doble del voltaje de alimentación. Con una modulación de 100%, este voltaje se duplica, de tal manera que el voltaje del colector ahora alcanza un máximo de

$$V_{c(max)} = 4V_{CC}$$

Este hecho se debe tener en mente al escoger transistores y otros componentes, como capacitores, para el circuito de entrada.

Otro factor por considerar es la disipación de la potencia. Aunque la eficiencia máxima teórica de un amplificador Clase C es de 100%, la eficiencia real es improbable que sea de más de 75%. La mayor parte de la potencia restante se disipa en el transistor, aunque una parte se convierte en calor en el circuito de salida y otros componentes. Aunque es probable que la eficiencia sea la misma con modulación, la disipación de la potencia sube.

EJEMPLO 10.4 Un amplificador de Clase C con modulador en el colector tiene una potencia de salida de portadora P_c de 100 W y una eficiencia de 70%. Calcule la potencia de la fuente de alimentación y la disipación de la potencia en el transistor con una modulación de 100%.

Solución Supóngase que toda la disipación de la potencia se da en el transistor. Esto da una respuesta moderada que proporciona un cierto margen de seguridad. La potencia de salida con una modulación de 100% es

$$\begin{aligned} P_o &= 1.5P_c \\ &= 1.5 \times 100 \text{ W} \\ &= 150 \text{ W} \end{aligned}$$

La potencia de la fuente de alimentación es

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{P_o}{\eta} \\ &= \frac{150 \text{ W}}{0.7} \\ &= 214 \text{ W} \end{aligned}$$

La potencia disipada P_D es la diferencia entre la potencia de entrada y la de salida

$$\begin{aligned} P_D &= P_s - P_o \\ &= 214 \text{ W} - 150 \text{ W} \\ &= 64 \text{ W} \end{aligned}$$

A propósito, ya se mencionó antes que el voltaje de suministro o de alimentación no debe cambiar con la modulación. Algunas veces sí cambia: puesto que el suministro se requiere para proporcionar hasta 50% de más potencia con modulación que sin ella, una fuente mal regulada podría ofrecer un voltaje menor cuando el transmisor tiene modulación completa. Si así sucede, la portadora tiene un amplitud menor con modulación que sin ella. El fenómeno se llama de portadora y es indeseable.

Circuitería de audio

Con la finalidad de amplificar la señal muy pequeña (del orden de 1 mV) desde un micrófono hasta un nivel suficiente para modular el transmisor, se requiere una red o combinación de circuitos. Para un transmisor grande de 50 kW o más, eso significa una cantidad considerable de potencia.

En un transmisor para comunicaciones, los circuitos de audio son directos. Quizá haya una forma de control automático de nivel (Automatic Level Control, ALC) para evitar la sobremodulación, mientras se mantiene la modulación tan cerca de 100% como sea posible. Es probable que haya también un cierto reajuste de la respuesta en frecuencia para resaltar aquellas frecuencias en el intervalo de la voz, desde alrededor de 300 Hz a 3 KHz, que son las más importantes para inteligibilidad. Las frecuencias más bajas contribuyen poco a la inteligibilidad y se desaprovecha energía si se transmitieran, en tanto que las frecuencias más altas desperdician ancho de banda.

La mayor parte de la circuitería de audio que se utiliza en la transmisión por radio no está, en realidad, en el transmisor. El equipo del estudio amplifica las pequeñísimas señales a partir de los micrófonos, reproductores de CD y las cabezas de cintas magnéticas, las mezcla (eléctricamente, el proceso es en realidad una suma), y aplica la compensación (ecualización) necesaria. El transmisor debe estar ubicado en una zona donde haya una cantidad considerable de terreno para instalar el sistema de la antena; el estudio puede estar en el mismo edificio, pero con frecuencia se ubica en un lugar más céntrico. En este caso, la señal de audio se envía al transmisor por una línea telefónica o un enlace de radio de microondas. El transmisor recibe una señal de nivel de línea, a menudo de +4 o de +8 dBm sobre 600 ohm, y la amplifica a los elevados niveles de potencia que necesita el modulador. La etapa final de audio es sin duda un circuito par complementario (push-pull) que opera en la Clase B, y con frecuencia utiliza tubos al vacío (bulbos).

Adaptación de la impedancia de salida

La mayoría de los transmisores prácticos se diseñan para que funcionen con una carga resistiva de 50 Ω con la finalidad de adaptarse a la impedancia característica del cable coaxial que se usa generalmente para conducir la potencia del transmisor a la antena. La antena podría no tener esta impedancia, pero en ese caso habrá circuitería de adaptación en la antena (o tan cercana a ella como sea práctico). Muchas veces la adaptación no es exacta, en particular si el sistema debe operar en un intervalo de frecuencias, y muchos transmisores tienen cierta latitud para el ajuste.

La red de circuitos de salida del transmisor se diseña para convertir la resistencia de carga estándar en la terminal de salida en cualquiera que requiera el dispositivo o los dispositivos activos. Aquí las condiciones varían en forma espectacular según el tipo de amplificador. Los transistores necesitan, regularmente, una impedancia de carga menor que 50 Ω , mientras que los tubos al vacío son adecuados para impedancias mucho más altas.

La forma más sencilla de encontrar la impedancia de carga requerida y apropiada para un amplificador Clase C es observar que para una portadora no modulada, el voltaje del colector varía entre casi cero y $2V_{CC}$. Entonces, el valor pico o máximo del voltaje de salida es

$$V_{o(pk)} = V_{CC}$$
$$V_{o(RMS)} = \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}}$$

Si se supone que el amplificador va a diseñarse para una salida de potencia específica a un voltaje de alimentación dado, puede aplicarse la ecuación de potencia usual para el voltaje RMS y una carga resistiva:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Como ya se conoce P y V y se requiere R, se reacomoda la ecuación:

$$R = \frac{V^2}{P}$$

En seguida, se sustituye el voltaje de salida y la potencia en esta ecuación para obtener

$$R_L = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{\sqrt{2}}\right)^2}{P_c}$$
$$= \frac{V_{CC}^2}{2P_c}$$

donde R_L = resistencia de carga observada en el colector (o placa, para un tubo al vacío)

P_c = potencia de salida de la portadora, sin modulación

V_{CC} = voltaje de alimentación del colector (o placa)

EJEMPLO 10.5 Se necesita un transmisor de AM para generar 10 W de potencia de portadora cuando funciona con una alimentación de 15 V. ¿Cuál es la impedancia de carga necesaria observada en el colector?

Solución

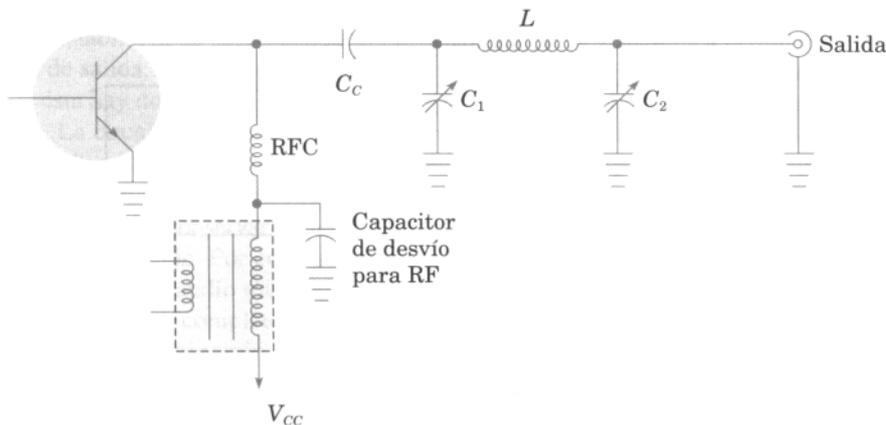
$$\begin{aligned}
 R_L &= \frac{V_{CC}^2}{2P_c} \\
 &= \frac{15^2}{2 \times 10} \\
 &= 11.25 \Omega
 \end{aligned}$$

Durante muchos años, la red π , que se ilustra en la figura 10.7(a), ha sido un circuito popular de salida. Su nombre proviene del parecido de su diagrama con la forma de la letra griega Pi. La red π se usa para transformar impedancias, aumentándolas o reduciéndolas, pero se adapta mejor a dispositivos activos que requieren una impedancia de carga regularmente alta, como en el caso de los tubos al vacío. Con dispositivos que requieren una impedancia de carga muy baja, como transistores bipolares con sólo algunos watts de salida, el diseño se logra en teoría, pero es probable que algunos de los valores de los componentes requeridos sean demasiado pequeños para ser prácticos.

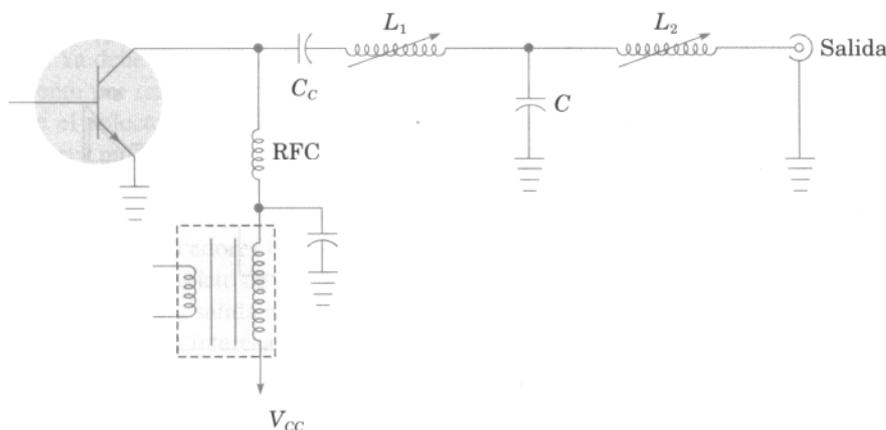
En los amplificadores de transistores de alta potencia con sus requisitos de valores bajos de impedancia de carga, es posible utilizar una variedad de circuitos de acoplamiento de banda angosta. Una red común se ilustra en la figura 5.4(b). Por obvias razones se llama red T. Hay ecuaciones y gráficas para auxiliar en el diseño de estos circuitos, pero es más fácil usar uno de los tantos programas para computadora disponibles. Uno accesible es APPCAD, se obtiene gratis en Agilent.

Para que sean prácticos, ambos circuitos requieren un capacitor extra (llamado C_c en las figuras) para conservar el voltaje de cc en el colector o la placa lejos de la antena. Algunos sistemas de antenas representan un cortocircuito para cc . Una bobina de inducción para RF (RF choke) se utiliza para permitir que la potencia alcance la etapa de salida.

Además de que transforman la impedancia, las redes π y T también actúan como filtros de pasabajos porque ayudan en la reducción de los niveles de las armónicas.



(a) Red pi



(b) Red T

Figura 10.7.- Circuitos de salida de banda angosta

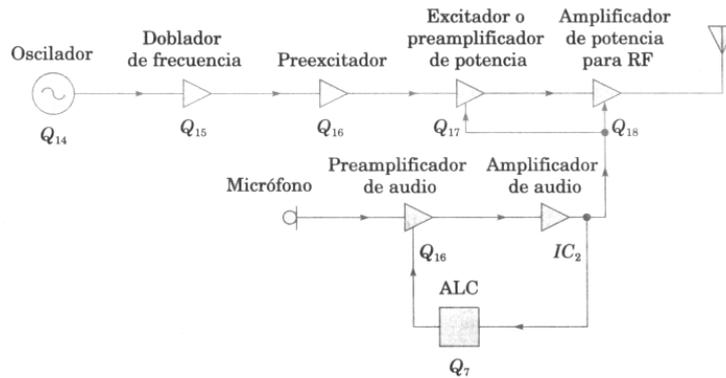


Figura 10.10- Diag de secciones del TX

En realidad, el oscilador es un sintetizador de frecuencia para conservar la exactitud y la estabilidad de la frecuencia controlada por cristal. Funciona a la mitad de la frecuencia de salida, de tal manera que la siguiente etapa es un doblador de frecuencia. Después de ésta hay dos etapas más de ganancia antes del amplificador de potencia de RF.

La circuitería de audio consiste en un preamplificador del micrófono seguido por un amplificador en circuito integrado, el cual también proporciona la potencia al parlante cuando el transceptor está en el modo de recepción. El control automático de nivel ALC se diseña para conservar el índice de modulación tan alto como sea posible sin permitir la sobremodulación. Por consiguiente, no hay necesidad de que el operador use un control de ganancia de audio mientras transmite, o que verifique el porcentaje de modulación.

El circuito completo del transceptor se ilustra en la figura 10.11. Si parece un tanto intimidante al principio, aquí están algunas recomendaciones para reordenarlo en forma conveniente. Primero, localice las conexiones de la antena y el micrófono. Luego, regrese desde la antena por la cadena de RF, compare los números de los transistores en los circuitos con los que están en el diagrama de bloques. De manera similar, empiece en el micrófono y recorra los circuitos de audio. Naturalmente, el hecho de que sea un transceptor hace que el circuito sea un poco más complicado.

Ya debe conocer algunos de los detalles del circuito. Observe la salida con acoplamiento por transformador sintonizada en Q15, el doblador de frecuencia. También, note que el colector tiene derivación en el devanado del primario de tal manera que no se reduzca mucho la Q del circuito sintonizado (esta técnica se trató en el capítulo 2).

El circuito de salida para el amplificador final es muy parecido a la red T descrita en la sección anterior, pero tiene una sección LC extra. Aunque ésta es en esencia una cadena de amplificadores de banda angosta, el ancho de banda es suficiente para abarcar el intervalo completo de frecuencia de CB de 26.965 a 27.405 MHz cuando el transmisor se sintoniza para salida máxima del canal 18 (27.175 MHz), cerca del centro de la banda.

También es interesante la red de circuitos de audio. La salida de IC2 modula tanto el preamplificador o excitador como el amplificador de potencia vía T1, el cual es un autotransformador y no el transformador ordinario que ya se trató. La modulación del pre-amplificador o excitador, así como la del amplificador de potencia es muy común con moduladores de transistores porque, de otra manera, el voltaje de saturación del transistor del amplificador de potencia evitaría que se alcanzara la modulación al 100%. Una muestra de la señal de salida del transformador de modulación va al circuito del ALC, el cual ajusta la ganancia del preamplificador del micrófono Q6 para conservar la salida de audio relativamente constante.

Diseño del transmisor AM moderno

Los transmisores AM se construyen desde que se inventaron los tubos al vacío (bulbos), y en cierta manera, su diseño ha cambiado muy poco desde entonces. Sin embargo, se han intentado recientemente algunos métodos nuevos. Claro, el mejor método podría ser, desde el punto de vista técnico, abandonar del todo la AM de portadora completa y usar algunos de los sistemas más eficientes para decirlo en pocas palabras. Pero por cuestiones históricas y económicas no es probable que suceda en un futuro cercano.

Los transmisores de AM de alta potencia son necesariamente grandes y caros, debido en gran parte a la cantidad de potencia que manejan el amplificador de potencia y el de modulación, los suministros de energía de alto voltaje que requieren los tubos al vacío y la necesidad de un transformador de modulación que sea capaz de manejar cantidades muy grandes de potencia de audiofrecuencia. Entre los esfuerzos recientes para mejorar los transmisores AM está el perfeccionamiento de amplificadores de alta potencia de estado sólido, y el uso de modulación por duración de pulsos y amplificadores de conmutación para el proceso de modulación. Aquí se presenta un ejemplo característico de cada técnica.

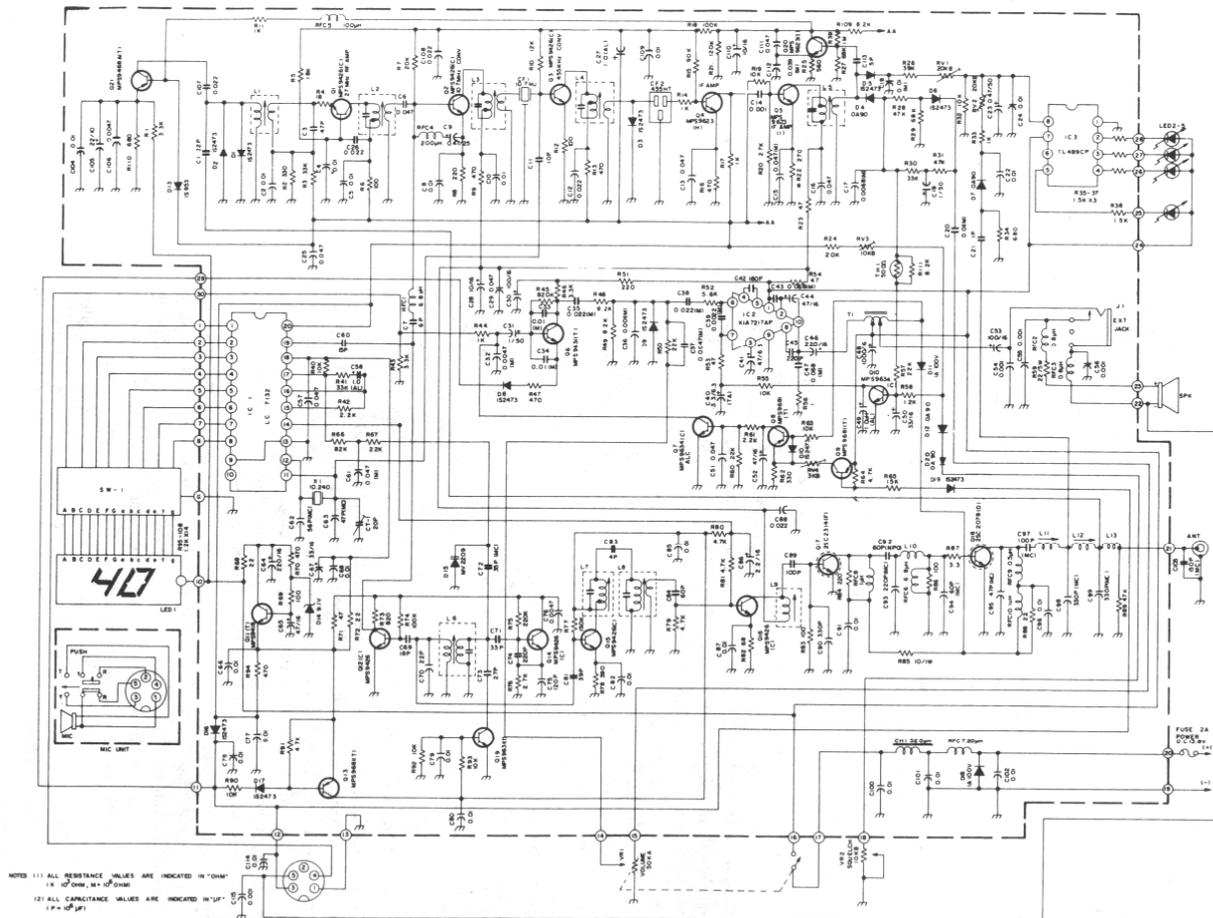


Figura 10.11 Diagrama electrónico de un transmisor de CB (Cortesía de Radio Shack, una división de Tandy Corporation).

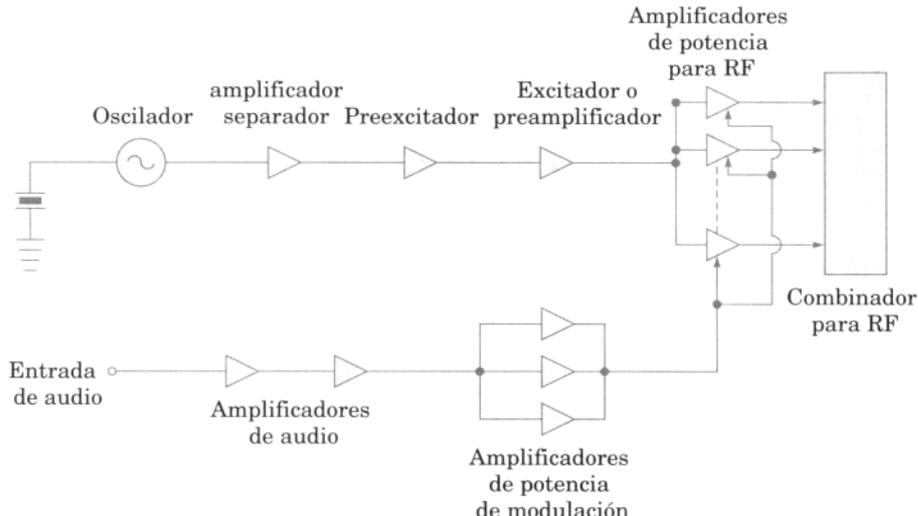


Figura 10.12.- Diagrama en bloques de un transmisor de estado sólido de alta potencia

Amplificadores de potencia de estado sólido para radiofrecuencia

Los transistores han tardado en apoderarse de los amplificadores de potencia de los transmisores, debido a que es más fácil usar uno o dos tubos al vacío grandes en lugar de muchos amplificadores de transistores separados y un combinator

complejo de potencia. El uso de los componentes de estado sólido proporciona mayor confiabilidad y mayor eficiencia, así como la reducción de las dimensiones físicas en 50%. Si se usan muchos módulos de salida puede operarse con una potencia que se reduce sólo ligeramente en el caso de que falle un transistor de salida y también se permite la conmutación instantánea y eficaz de los niveles de potencia. A menudo esto se requiere de los transmisores para radiodifusión, puesto que muchas estaciones requieren potencia reducida por la noche para evitar la interferencia. Las señales en la banda estándar de radiodifusión de AM tienden a viajar más lejos de noche que de día (vea en el capítulo 15 la explicación de este fenómeno).

En la figura 10.12 se ilustra el diagrama de bloques de un transmisor de estado sólido. Tanto los amplificadores de potencia para RF como para audio están constituidos por una cierta cantidad de módulos de estado sólido, casi siempre de seis a 12. Las salidas de los módulos para RF deben combinarse antes de ser aplicados a la antena.

Moduladores por duración de pulsos

El modulador tradicional de Clase B (o AB) descrito antes, se vuelve muy caro cuando hay niveles de potencia grandes. El de Clase C, aunque es más eficaz, no puede usarse en audio a causa de la cantidad extrema de distorsión que generaría. No obstante, hay otro modo para amplificar lineal y eficientemente el audio. Algunas veces se llama amplificación por conmutación o de Clase D, pero en esencia es una modulación por duración de pulsos.

Suponga que la señal de audio de la figura 10.13(a) se muestra a intervalos frecuentes (en teoría, debe mostrarse por lo menos dos veces por ciclo, pero en la práctica la tasa o frecuencia debe ser mayor). El resultado son las muestras analógicas discretas que se ilustran en la figura 10.13(b). Posteriormente, se supone que un conmutador electrónico se enciende durante un tiempo que es proporcional a la amplitud de la muestra. El resultado es modulación por duración de pulsos, PDM (pulse-duration modulation, (PDM)) o modulación por ancho de pulso (pulse-width modulation (PWM)), la cual se ilustra en la figura 10.13(c). La conmutación genera los impulsos, así que la eficiencia teórica es hasta de 100% (ya que un conmutador ideal tiene corriente cero en él cuando está abierto y voltaje cero cuando está cerrado, nunca se disipa la energía).

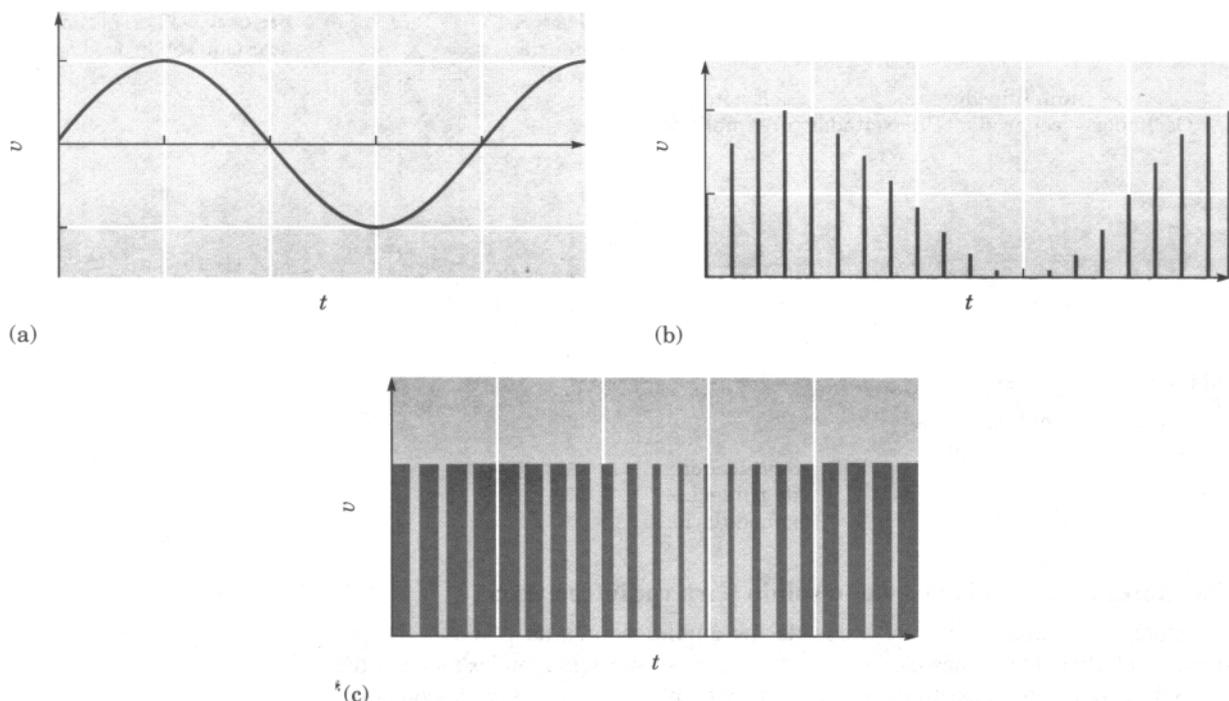


Figura 10.13 Modulación por duración de pulsos (PDM)

Esta señal PDM se desmodula mediante un simple filtrado pasabajos. Este proceso es eficiente 100% en teoría, pero no en la práctica, naturalmente. Además, la eficiencia podría ser mayor en gran medida que la de un amplificador de Clase B.

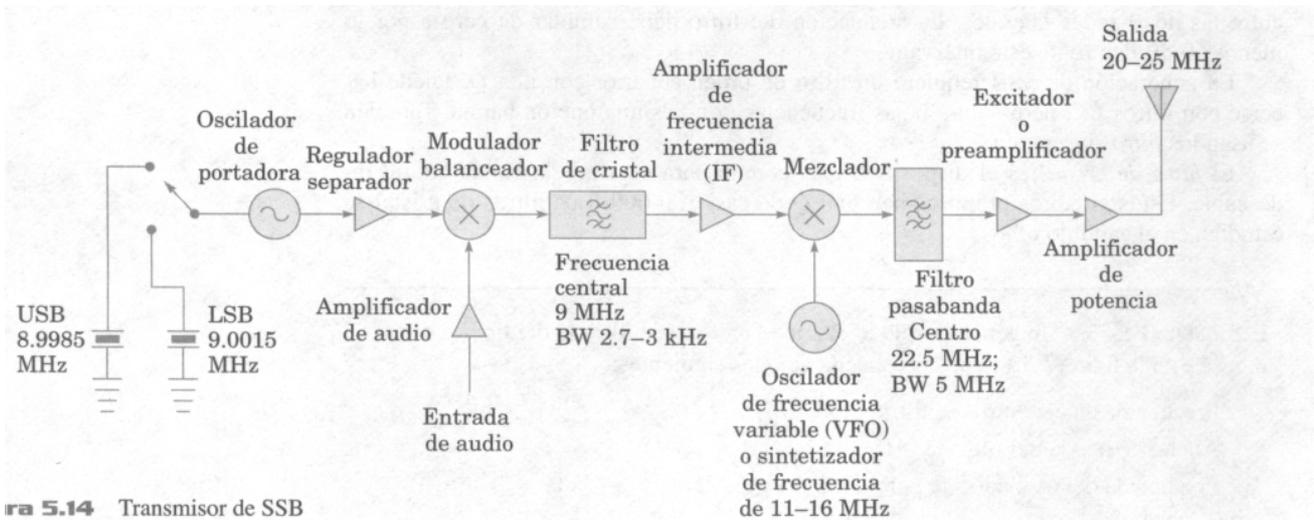
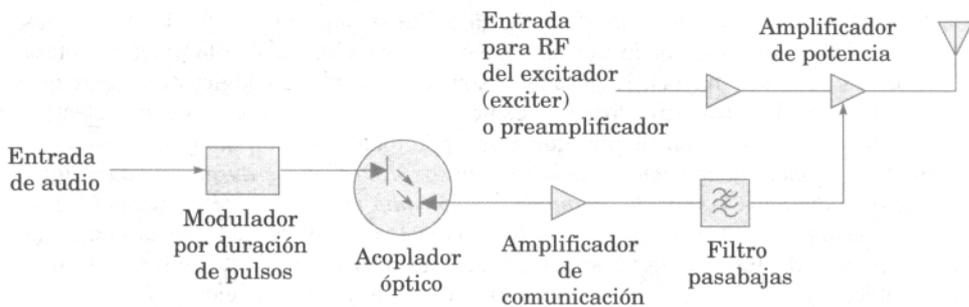
Esta configuración se ha usado a veces en los amplificadores de audio de relativamente baja potencia que se encuentran en los sistemas de sonido de los hogares y de los comercios, pero es un poco complicado por lo que no es muy popular. En los transmisores grandes, la ganancia de eficiencia bien vale casi cualquier cantidad de complicaciones. En la figura 10.14 se ilustra una realización posible, en la cual a un modulador PDM de estado sólido le sigue un amplificador de conmutación tipo tubo al vacío que se utiliza para modular un amplificador de potencia para RF de tubos al vacío. Ob-

serve el acoplador óptico, el cual aísla la red de circuitos de estado sólido de las altas tensiones en la parte de los tubos de vacío del transmisor.

Modulación digital de la amplitud

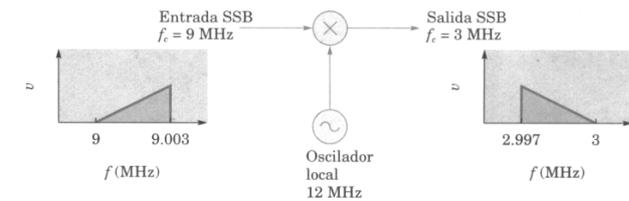
En esta técnica, que patentó Harris Corporation, se utilizan varios amplificadores de potencia de estado sólido, según se ilustró en la figura 10.12. Sin embargo, en lugar de modular de manera continua la salida de todos los amplificadores, el esquema digital funciona conectando y desconectando cada uno de los amplificadores. La señal analógica de audio que llega se muestra y se digitaliza mediante una palabra de 12 bit, y los bits se usan para controlar cada amplificador. Hay una ganancia considerable en la eficiencia, puesto que cada amplificador funciona a toda su potencia o está apagado, y no se necesitan etapas de audio de alta potencia.

A veces, la eficiencia de un esquema de modulación se define como el cociente de la potencia de la banda lateral entre la potencia total transmitida. Entonces, según esta definición, ¿cuál es la eficiencia máxima de una señal AM?

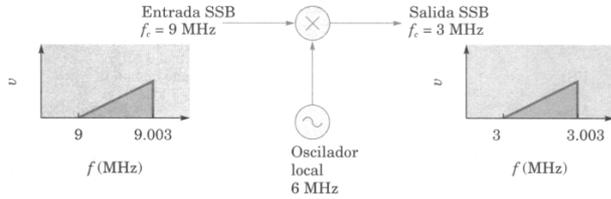


ra 5.14 Transmisor de SSB

Figura 10.14.- Transmisor de BLU

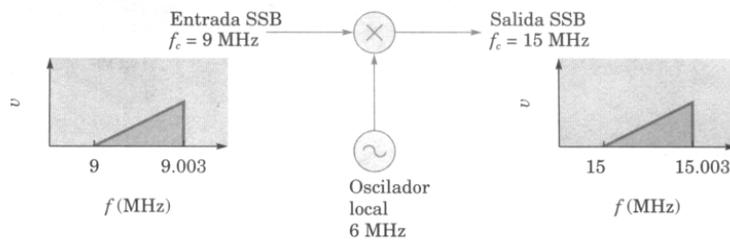


(a) Conversión reductora de frecuencia, mezclado sustractivo con inyección lateral alta

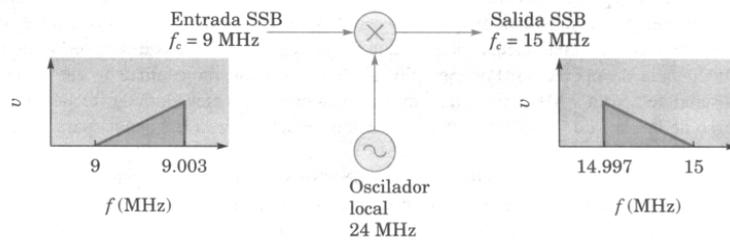


(b) Conversión reductora de frecuencia, mezclado sustractivo con inyección lateral baja

Figura 10.15.- Conversiones de frecuencia en BLU



(c) Conversión elevadora de frecuencia, mezclado aditivo



(d) Conversión elevadora de frecuencia, mezclado sustractivo

Transmisor de FM

La figura 10-16 muestra la configuración típica de un transmisor de FM o de PM en el que se emplea el método indirecto de generación de FM. Un oscilador a cristal estable genera la señal de la portadora y un amplificador de aislamiento aísla el resto del sistema. La señal de la portadora se aplica a un modulador de fase similar a los ya descritos. La entrada de voz se amplifica y procesa para limitar el intervalo de frecuencias e impedir la sobredesviación. La salida del modulador es la señal de FM deseada.

La mayoría de los transmisores de FM se usan en el intervalo de VHF y UHF, pero no se dispone de cristales para generar esas frecuencias en forma directa. Como resultado, en general la portadora se genera a una frecuencia mucho más baja que la frecuencia de salida final. Para obtener la frecuencia de salida deseada, se utilizan una o más etapas de multiplicación de frecuencia. Un multiplicador de frecuencia es un amplificador clase C cuya frecuencia de salida es un múltiplo entero de la frecuencia de entrada. La mayoría de los multiplicadores de frecuencia incrementan ésta en un factor de 2, 3, 4 o 5, y puesto que son amplificadores clase C, también proporcionan una modesta amplificación de potencia.

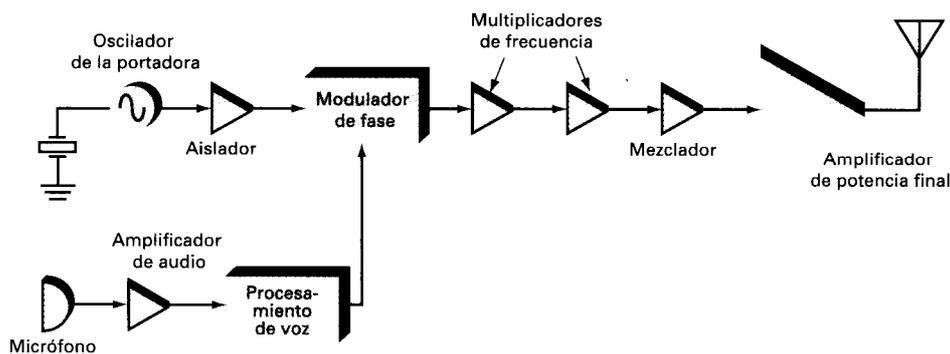


Figura 10-16 Transmisor de FM típico que usa modulación de frecuencia indirecta con un modulador de fase.

Las diferencias entre los transmisores de FM y AM son fáciles de entender si se empieza por considerar las diferencias entre las señales de FM y AM. Primero, FM requiere que la frecuencia del transmisor varíe. Lo anterior significa a su vez que la modulación debe aplicarse de manera temprana, quizá en la etapa del oscilador de portadora (lo de "quizá" es para dejar espacio para la FM indirecta, la cual se explica más adelante).

Otra diferencia es que las señales de FM no tienen variaciones en la amplitud. Esto quiere decir que los transmisores FM pueden emplear en todas partes la Clase C, incluso después de la modulación.

Los multiplicadores de frecuencia se usan antes de la etapa del modulador en los transmisores de AM cuando se necesitan frecuencias portadoras muy altas. Las etapas multiplicadoras se usan por la misma razón en los transmisores de FM, pero tienen además otra función: la multiplicación de la frecuencia de una señal FM también multiplica la desviación. Puesto que la cantidad de desviación de la frecuencia que puede conseguirse es muy pequeña con algunos tipos de moduladores de FM, la multiplicación de la frecuencia se usa a menudo como una manera de aumentar la desviación.

La figura 10.16 es un diagrama de bloque simplificado de un transmisor de FM representativo. Naturalmente, hay muchas variantes en él, y algunas de éstas se explican en las siguientes secciones. Por ejemplo, la multiplicación de la frecuencia no siempre se requiere, lo cual depende del diseño del modulador y de la cantidad de desviación que se necesita.

El estudiante ya se habrá dado cuenta de que el transmisor de la figura 10.16 está dividido en dos partes: el excitador o preamplificador (exciter) y el amplificador de potencia. Esto es una característica de los transmisores grandes como los que se utilizan en las radiodifusoras, donde el excitador es una unidad aparte que contiene la etapa de audio y la etapa para RF de baja potencia. Las etapas del amplificador de potencia (que incluyen alta tensión, grandes cantidades de potencia y enfriamiento por aire a presión o mediante agua y, algunas veces, tecnología de tubos al vacío) están en cabinas separadas. En los transmisores pequeños, como los que se usan en las comunicaciones móviles, todo está junto, naturalmente. Las producciones actuales son por completo de estado sólido.

El multiplicador de frecuencia no sólo aumenta la frecuencia de la portadora hasta la frecuencia de salida deseada, sino que también multiplica la desviación de frecuencia que produce el modulador. Muchos moduladores de frecuencia y de fase sólo generan un desplazamiento de frecuencia pequeño, mucho menor que la desviación final deseada. El diseño del transmisor es tal que los multiplicadores de frecuencia proporcionan el valor correcto de multiplicación, no sólo para la frecuencia de la portadora, sino también para la desviación de modulación.

Después de los multiplicadores de frecuencia se tiene un amplificador de excitación clase C para incrementar lo suficiente el nivel de potencia a fin de operar el amplificador de potencia final. El amplificador de potencia también opera en clase C.

La mayoría de los transmisores de comunicaciones de FM operan en niveles de potencia más o menos bajos, por lo común a menos de 100 W. Todos los circuitos utilizan transistores, incluso en el intervalo de VHF y UHF. Para niveles de potencia superiores a varios cientos de watts, deben usarse tubos al vacío. En las etapas de amplificación finales de transmisores para radiodifusión en FM suelen emplearse grandes amplificadores clase C con tubos al vacío. En los transmisores de FM que operan en el intervalo de las microondas se usan klistrones, magnetrones y tubos de onda progresiva para proporcionar la amplificación de potencia final.

Moduladores de FM directa

Las señales FM se generan en forma directa, cuando se varía la frecuencia del oscilador de portadora, o indirecta, o cuando se convierte la modulación de fase en modulación de frecuencia. En esta sección se estudian las técnicas para FM directa; la FM indirecta se trata después.

En la FM directa se requiere que la frecuencia del oscilador de portadora varíe en forma correspondiente con la amplitud instantánea de la señal modulante (después que se añadió cualquier preacentuación necesaria). La manera más

simple de lograrlo es usando un modulador de reactancia. Para su funcionamiento utiliza la señal modulante para modificar una reactancia en el circuito que determina la frecuencia. Una manera ordinaria de construir un modulador de reactancia es instalar un varactor o diodo de reactancia variable dentro del circuito que determina la frecuencia en el oscilador de portadora. En la figura 10.17 se ilustran dos circuitos sencillos: en la figura 10.17(a) se usa un oscilador LC, y en el circuito de la figura 10.17(b) uno controlado por cristal. En ambos circuitos, el varactor tiene polarización inversa y ésta varía con la señal modulante.

El circuito de la figura 10.17(a) ya se conoce desde el capítulo 2 como oscilador Clapp. La frecuencia se determina principalmente mediante L_1 y el varactor. El capacitor C_3 tiene un gran valor y su función es aislar al varactor de V_{cc} ; C_1 y C_2 determinan la fracción de realimentación y su efecto es pequeño en la frecuencia. El potenciómetro sintonizador ajusta la polarización de de en el varactor. A esto se agrega la señal modulante de ac, lo que ocasiona que el voltaje de polarización y, por lo tanto, la frecuencia, varíen alrededor de su valor nominal.

Son posibles los valores muy grandes de desviación de la frecuencia mediante una modulación con varactor de un oscilador LC. De hecho, hay diseños de transmisores FM para radiodifusión que generan la señal de FM en la frecuencia de portadora, y alcanzan los 75 kHz de desviación sin ninguna multiplicación de frecuencia. En cambio, un oscilador LC en las frecuencias de VHF es muy inestable, por lo que requiere alguna forma de control automático de frecuencia (Automatic Frequency Control (AFC)).

En lo que respecta a la versión controlada por cristal de la figura 10.17(b), su frecuencia cambia sólo muy poco (regularmente, sólo unas decenas de hertz) con la modulación. Siempre se necesita multiplicar mucho la frecuencia con los moduladores de FM directa controlados por cristal.

Una forma más moderna de generar FM directa es usar un VCO (oscilador controlado por voltaje) de circuito integrado o un oscilador también de Circuito Integrado con un varactor externo. En el caso de aplicaciones que requieren baja potencia como los teléfonos inalámbricos hasta es posible tener un transmisor completo en un circuito integrado. El MC2833, es un ejemplo.

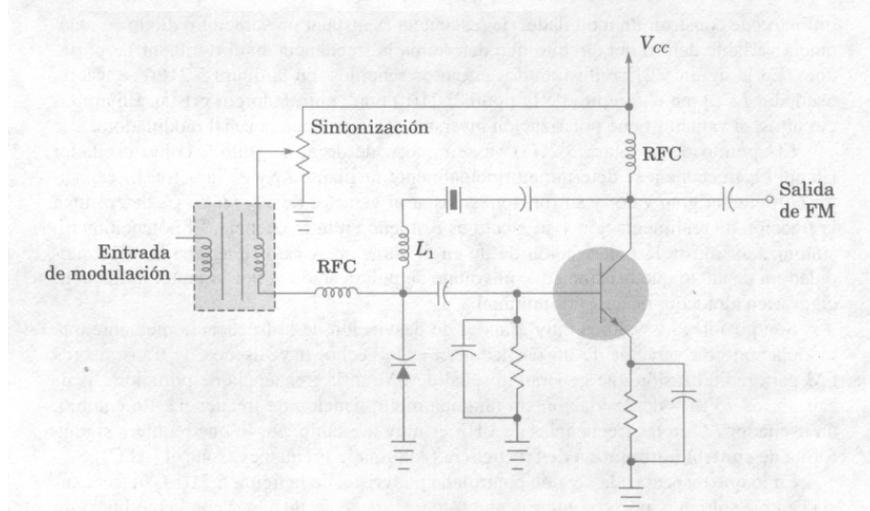
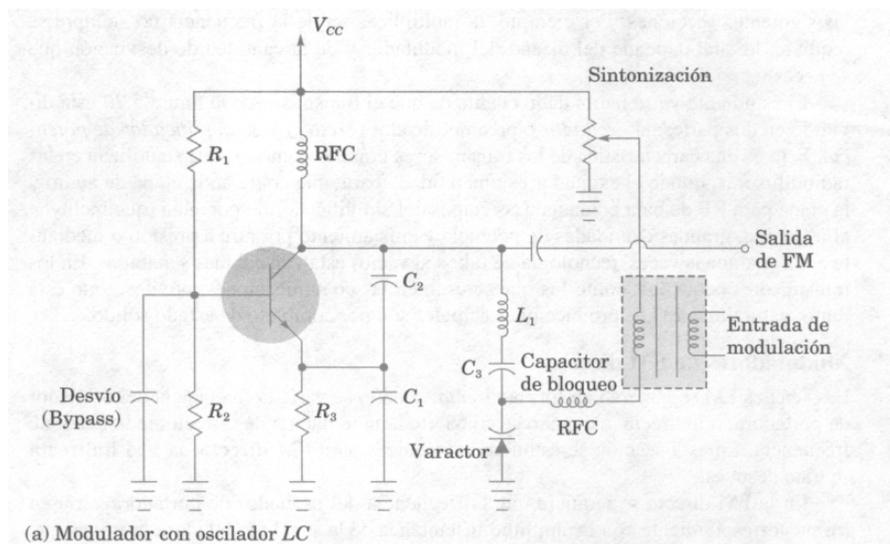


Figura 10.17.-

Multiplicadores de frecuencia

Los multiplicadores de frecuencia se estudiaron oportunamente. El estudiante debe recordar que son en esencia amplificadores de Clase C con el circuito de salida sintonizado con una armónica de la frecuencia de entrada. Los duplicadores y los triplicadores son los tipos más comunes de multiplicadores de frecuencia, aunque es posible mayor multiplicación a expensas de reducir la eficiencia.

Los multiplicadores de frecuencia son útiles en particular en los transmisores de FM, porque multiplican la desviación de una señal de FM por el mismo factor que la frecuencia portadora. Es fácil demostrar cómo se hace. Primero suponga que una portadora no modulada con frecuencia f_c se aplica en la entrada de un circuito que multiplica la frecuencia por N . Entonces, la frecuencia de la señal de salida es Nf_c . Ahora suponga que debido a la modulación, la frecuencia de la entrada se modifica en una cantidad δ a $(f_c + \delta)$. La señal de salida tendrá una frecuencia de

$$\begin{aligned} f_o &= N(f_c + \delta) \\ &= Nf_c + N\delta \end{aligned}$$

la cual corresponde a una portadora de N veces la frecuencia original de la portadora, con una desviación de frecuencia N veces la desviación original. Por consiguiente, un multiplicador de frecuencia es capaz de incrementar lo necesario a la desviación obtenida en el modulador.

EJEMPLO. Un transmisor de FM directa tiene un modulador con varactor con $k_f = 2 \text{ kHz/V}$ y una desviación máxima de 300 Hz. A este modulador le sigue un regulador separado y tres etapas de multiplicación de frecuencia: un triplicador, un duplicador y otro triplicador y luego, sigue un excitador o preamplificador (driver) y un amplificador de potencia.

- Trace un diagrama de bloques para este transmisor.
- ¿Este transmisor será capaz de dar una desviación de 5 kHz en la salida?
- ¿Cuál debe ser la frecuencia del oscilador si el transmisor va a funcionar a una frecuencia de portadora de 150 MHz?
- ¿Qué voltaje de audio se requiere en la entrada del modulador para lograr una desviación completa?

Solución

Vea el diagrama de bloques de este transmisor en la figura 10.18.

Los multiplicadores de frecuencia multiplican la desviación por un factor de $3 \times 2 \times 3 = 18$

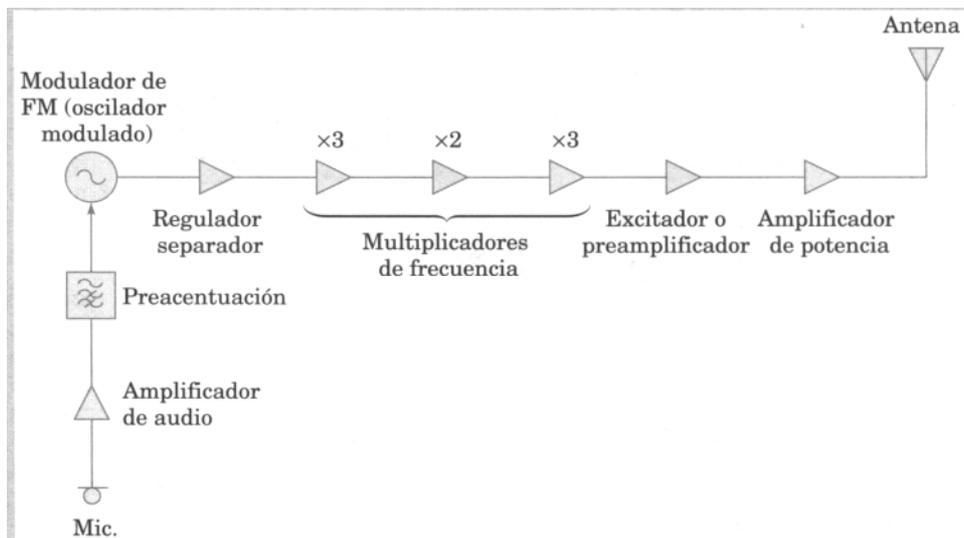


Figura 10.18

La desviación máxima en el oscilador debe ser entonces de:

$$\begin{aligned} \delta_{osc} &= \frac{\delta_o}{18} \\ &= \frac{5 \text{ kHz}}{18} \\ &= 278 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Como el modulador es capaz de dar una desviación de 300 Hz, esto permite que la desviación de salida alcance 5 kHz. La frecuencia del oscilador se multiplica por 18, de tal manera que

$$\begin{aligned} f_{osc} &= \frac{f_o}{18} \\ &= \frac{150 \text{ MHz}}{18} \\ &= 8.33 \text{ MHz} \end{aligned}$$

En el inciso (b) se determinó que la desviación total de 5 kHz en la antena requería una desviación en el oscilador de 278 Hz. Por lo tanto, el nivel requerido de la señal modulante en la entrada se calcula mediante:

$$\begin{aligned} k_f &= \frac{\delta}{V_i} \\ V_i &= \frac{\delta}{k_f} \\ &= \frac{278 \text{ Hz}}{2000 \text{ Hz/V}} \\ &= 0.139 \text{ V} \end{aligned}$$

Como la desviación es un valor pico o máximo, también lo es el voltaje de entrada. Si se necesita un voltaje RMS, será de:

$$\begin{aligned} V_i \text{ RMS} &= \frac{V_i \text{ pico}}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{0.139 \text{ V}}{\sqrt{2}} \\ &= 0.098 \text{ V} \\ &= 98 \text{ mV} \end{aligned}$$

Naturalmente, al incrementar la desviación por medio de la multiplicación de la frecuencia, también aumenta la frecuencia de la portadora. ¿Qué hacer en el caso de que la multiplicación suficiente para lograr la cantidad requerida de desviación dé como resultado una frecuencia portadora que es demasiado alta? En realidad, la solución a ese problema es muy simple: la frecuencia de portadora puede disminuirse mediante mezclado, como se ilustra en la figura 5.24.

Por medio del proceso de mezcla es posible cambiar la frecuencia de la portadora a cualquier valor, pero esto no tiene efecto en la desviación. Esto también es fácil de demostrar. Sea $(f_c + \delta)$ la frecuencia de una entrada al mezclador y sea f_{LO} la frecuencia de la otra entrada, proporcionada por un oscilador local. El mezclador producirá las frecuencias de suma y diferencia, pero en este caso, la que se usa es la diferencia, puesto que la finalidad es reducir la frecuencia portadora. Aquí hay dos posibilidades, que dependen de cuál frecuencia es más alta. Si la frecuencia portadora es más alta que la frecuencia del oscilador local, la salida es

$$\begin{aligned} f_o &= (f_c + \delta) - f_{LO} \\ &= (f_c - f_{LO}) + \delta \end{aligned}$$

La frecuencia portadora se redujo, pero la desviación no cambió. Por el contrario, si $f_{LO} >$

$$\begin{aligned} f_o &= f_{LO} - (f_c + \delta) \\ &= (f_{LO} - f_c) - \delta \end{aligned}$$

Ahora la frecuencia portadora se redujo y la desviación cambió de signo, pero no de magnitud. El cambio de signo equivale a un desplazamiento de fase de 180° en la señal modulante y esto no significa una diferencia práctica.

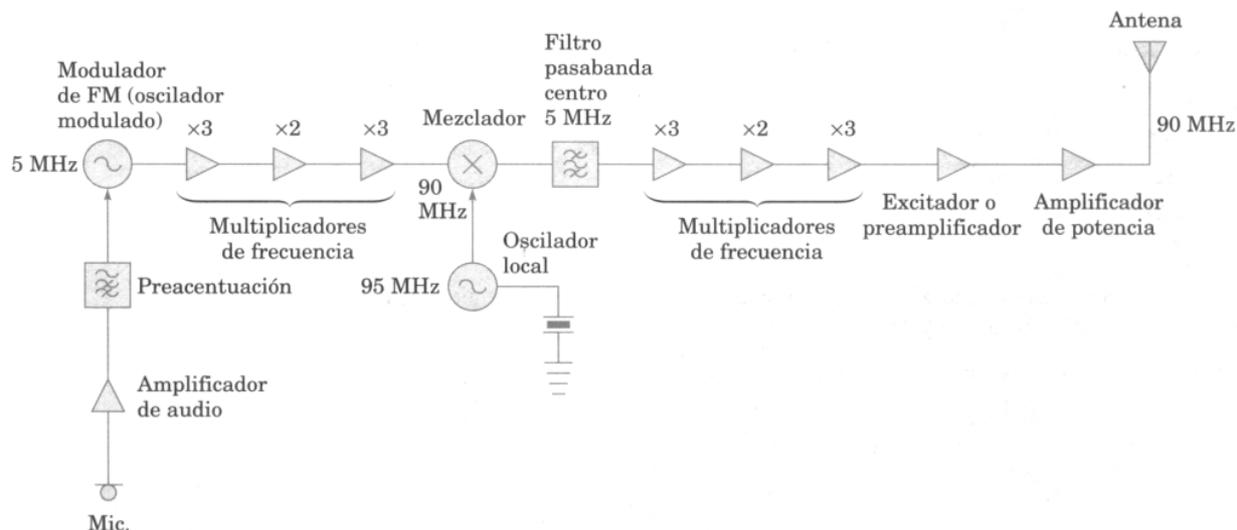


Figura 10.19 Transmisor de FM con multiplicación y mezclado

EJEMPLO 5.10 Para el transmisor de la figura 10.19, calcule la desviación de la frecuencia requerida del oscilador si la frecuencia de salida se desviará 75 kHz.

Solución: En este transmisor, la frecuencia de un oscilador modulado que funciona a 5 MHz está multiplicada por 18, justo como en el ejemplo anterior. Luego, la señal vuelve a mezclarse para tener 5 MHz y se multiplica de nuevo por 18. La multiplicación neta es 18 para la frecuencia de portadora, pero la desviación se multiplicó por $18 \times 18 = 324$. Una desviación de 75 kHz en la antena requeriría que la frecuencia del oscilador se desviara sólo $(75 \text{ kHz})/324 = 232 \text{ Hz}$.

Moduladores de FM indirecta

Se dedicó mucho espacio a demostrar que FM y PM están muy relacionadas. Como repaso, el índice de modulación en la modulación de la frecuencia con una señal modulante senoide es

$$m_f = \frac{\delta}{f_m}$$

donde δ = desviación máxima de frecuencia
 f_m = frecuencia de la señal moduladora
 m_f = índice de modulación, y también la desviación máxima de fase en radianes

Por lo tanto, hay más desviación de fase en una señal de FM para frecuencias modulantes inferiores. La modulación de frecuencia se consigue mediante un modulador de fase si la señal modulante pasa por un filtro pasabajos conveniente antes que llegue al modulador, así que las frecuencias modulantes inferiores producirán mayor desviación de fase.

El último adelanto en la modulación de FM es el oscilador controlado numéricamente (Numerically-Controlled Oscillator, NCO). Un número binario controla la frecuencia de un NCO; dicho número está escrito en un registro en el dispositivo. Puede verse como la versión digital de un VCO. La señal en banda base tiene que digitalizarse antes de ser usada para modular la portadora, de aquí que esta forma de modulación a menudo se le llama FM digital, aunque la salida de este modulador es la misma señal analógica que se estudió en el capítulo 4.

Un modulador con un NCO tiene la ventaja de que su frecuencia de salida es tan exacta como el cristal de reloj; no se necesita ningún PLL. Estas condiciones permiten que un modulador NCO funcione con cualquier frecuencia de señal en banda base, hasta llegar a dc.

Los moduladores NCO operan en general con una sola frecuencia portadora en el intervalo de unos pocos MHz (5 MHz es lo usual). El transmisor tiene un mezclador y un oscilador local para elevar la frecuencia portadora hasta la frecuencia de salida asignada, justo como se hace en los transmisores de SSB. Vea la figura 10.20.

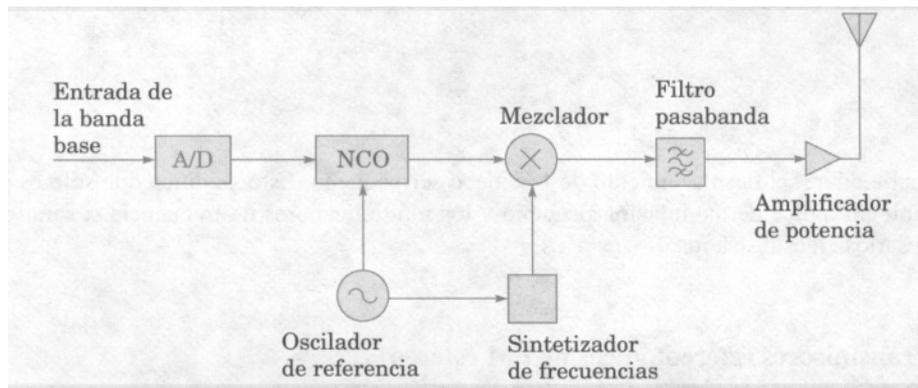


Figura 10.20 Transmisor de FM con modulación digital

Para quienes estén familiarizados con la terminología del cálculo hay otra manera de considerar la situación: observe que ya que la fase es en esencia la integral de la frecuencia, entonces, es posible integrar la señal en banda base y luego aplicarla a un modulador de fase. La señal resultante es exactamente la misma que si la señal en banda base original se hubiera aplicado a un modulador de frecuencia. De hecho, un circuito integrador es un filtro pasabajas, así que las dos explicaciones llevan al mismo resultado. En la figura 10.20 se ilustra la idea general del transmisor de FM indirecta. Una razón para usar FM indirecta es que es más fácil cambiar la fase de un oscilador de cristal.

Medidas de potencia del transmisor

Muchas de las mediciones que deben efectuarse en la red de circuitos del transmisor son muy comunes, y comprenden la medición de cantidades de *dc* o cantidades de *ca* de baja frecuencia. No se requieren técnicas especiales, pero sí ciertas precauciones.

Primero, hay ciertos requisitos de seguridad. Los técnicos que están acostumbrados a los circuitos de estado sólido podrían sentirse intimidados ante los niveles de voltaje (en kV) que se encuentran en los transmisores tipo tubos al vacío (bulbos). Y deben estarlo. Estas tensiones o voltajes provienen, a menudo, de fuentes de alimentación que tienen la capacidad de proporcionar varios amperes de corriente, y es probable que los accidentes sean fatales. Los compartimientos de alta tensión están asegurados internamente, la potencia se elimina cuando se abren; debe resistirse a la tentación de vencer los interruptores de seguridad. El principiante debe apegarse rigurosamente al manual y trabajar con una persona experimentada.

También existe la posibilidad de sufrir quemaduras por RF. La salida de un transmisor de varios kilowatts es, obviamente, muy peligrosa, pero hasta un transmisor pequeño es capaz de causar quemaduras dolorosas si los conductores de la antena se tocan durante la operación. ¡El autor lo descubrió de la manera difícil hace muchos años con un transmisor de 30 W! Cualquier transmisor en operación debe ser tratado con respeto y cuidado.

En referencia a RF, los campos fuertes de radio frecuencia causan problemas cuando se efectúan mediciones que, al parecer, no están relacionadas. Todo el equipo electrónico para pruebas debe conectarse en forma apropiada a tierra y blindarse para evitar interferencia.

Los transmisores deben probarse fuera del aire, siempre que sea posible, con la finalidad de evitar la formación de interferencia. Las cargas adecuadas para dicha prueba se explican en la siguiente sección.

Hay muchas situaciones en las que tiene que medirse la potencia en un circuito de RF. Los vatímetros ordinarios, como los que se usan para las frecuencias de las líneas de alimentación convencionales, son inútiles debido a la reactancia de sus bobinas. En esta sección se examinan sólo algunas de las maneras en las cuales la potencia puede medirse a altas frecuencias.

Es posible medir la potencia midiendo la tensión o voltaje que pasa por una resistencia conocida; esto se efectúa con un osciloscopio o con un voltímetro tipo rectificador de *ac* de alta frecuencia de diseño especial. El problema es estar seguro de que la resistencia es precisamente eso: que resista y que esté libre de reactancia inductiva o capacitiva. Los resistores comunes de carbono se usan para baja potencia a frecuencias dentro del intervalo de VHF, pero los resistores con devanado de alambre tienen demasiada inductancia. Los resistores no inductivos de esta clase reciben a menudo el nombre de *cargas ficticias*, ya que pueden conectarse a un transmisor en lugar de una antena para hacer pruebas.

Una manera de medir la potencia verdadera es midiendo su efecto de calentamiento. Lo anterior tiene la ventaja de ignorar cualquier potencia reactiva y no requerir ninguna conexión del equipo de prueba a puntos de altas frecuencias o de alta tensión o voltaje. Una técnica común es medir la potencia de un transmisor grande que funciona con cargas ficticias u fantasmas. Quizá sea sorprendente que una variante de la misma idea se usa para medir cantidades realmente pequeñas (miliwatts) de potencia en las frecuencias de microondas.

Cuando la carga del transmisor es una antena verdadera, la medición de la potencia se complica. La antena podría verse como algo que se aproxima a una resistencia pura, pero no siempre es así. La impedancia de la antena se trata detalladamente más adelante en el libro; por ahora sólo se señala que varía con la frecuencia y que podría tener muy bien un componente reactivo que es inductivo en una frecuencia y capacitivo en otra. Además, si la carga no se acopla exactamente con la línea de transmisión que la alimenta, alguna potencia se reflejará desde la carga y son muy engañosas las

mediciones de voltaje o de corriente en el extremo transmisor de la línea. Las radiodifusoras instalan un amperímetro para RF en la antena; éste da un indicio exacto de la potencia de la portadora, siempre que se conozca el componente resistivo de la impedancia de la antena.

Algunos medidores tienen acopladores direccionales que les permiten distinguir entre la potencia que fluye desde el transmisor hacia la antena y la potencia reflejada desde la antena. Al restar las dos lecturas se tiene la potencia real entregada a la antena. Los elementos que se le conectan permiten medir una amplia variedad de niveles de potencia a diferentes frecuencias. La dirección del flujo de potencia que se va a medir la da la flecha en el elemento conectado y se cambia mediante el simple giro del elemento. El instrumento de medición es un microamperímetro de de que se retira con facilidad de la caja para montaje remoto.

Repaso

A continuación presentamos los puntos principales que se trataron en esta parte general.

1. Un transmisor debe generar una señal en la frecuencia portadora correcta, con el nivel de potencia adecuado y con la modulación que sea una reflexión exacta de la señal original de información.
2. Es importante en el diseño de cualquier transmisor reducir al mínimo la presencia de señales espurias en la salida.
3. La eficiencia de un transmisor es una especificación importante sobre todo en vista de los enormes niveles de potencia que se usan a menudo.
4. Un transmisor característico de AM tiene un oscilador controlado por cristal o de frecuencia sintetizada al que siguen varias etapas de amplificación. Por lo regular, en la etapa final de amplificación, llamada amplificador de potencia, se efectúa la modulación. Esto permite que todos los pasos funcionen en la Clase C.
5. La modulación de alto nivel se usa en la mayoría de los transmisores de AM para conseguir mayor eficiencia. Esto requiere modulación en el elemento de salida de la etapa de salida del transmisor. Cualquier otro tipo de modulación es de bajo nivel.
6. Una señal DSB-SC de AM se genera por medio de un modulador balanceado al cual se aplican las señales de banda base y de frecuencia de portadora.
7. En general, los transmisores de SSB filtran una señal DSB-SC para eliminar la banda lateral indeseable, luego usan un mezclador para desplazar la señal a la frecuencia de operación.
8. Las señales de SSB, como todas las señales de AM, requieren amplificación lineal.
9. Los transmisores requieren un circuito para adaptar o acoplar la impedancia entre la salida del amplificador de potencia y la antena. Un circuito de adaptación diseñado en forma adecuada, también funciona como un filtro para evitar que las frecuencias espurias sean radiadas.
10. La FM se genera de dos maneras básicas. La FM directa necesita que se module la frecuencia del oscilador de portadora. En la FM indirecta, la señal en banda base se incorpora y luego se aplica a un modulador de fase.
11. Los multiplicadores de frecuencia se usan para aumentar la desviación de frecuencia en un transmisor de FM. Los mezcladores se usan para desplazar la frecuencia de salida sin afectar la modulación.
12. La mayoría de los transmisores de FM utilizan moduladores con PLL; en algunos diseños recientes se usan osciladores controlados numéricamente.
13. Los amplificadores no lineales pueden usarse para amplificar las señales FM.
14. Las técnicas para medir la potencia de salida de los transmisores comprenden vatímetros calorímetros basados en acopladores direccionales y amperímetros para RF, entre otros.

10-2 Amplificadores de potencia

En los transmisores se usan tres tipos básicos de amplificadores de potencia: *lineales*, *clase C* y *por conmutación*. Los amplificadores lineales proporcionan una señal de salida que es una réplica idéntica y aumentada de la entrada; su salida es directamente proporcional a su entrada y, por lo tanto, reproducen de manera fiel una entrada, pero a un nivel de potencia más alto. Todos los amplificadores de audio son lineales. Para elevar el nivel de potencia de señales de RF de amplitud variable, como las señales de AM o BLU de bajo nivel, es necesario usar amplificadores RF lineales. Las señales de frecuencia modulada no varían en amplitud y, por lo tanto, pueden ampliarse con amplificadores clase C o de conmutación no lineales, los cuales tienen una eficiencia mayor.

Amplificadores lineales

Los amplificadores lineales operan en clase A, AB o B. La clase de un amplificador indica la forma en que se polarizará. Un amplificador clase A se polariza de tal modo que conduce corriente de manera continua. La polarización se ajusta para que la entrada haga variar la corriente del colector (o de drenaje) en una región lineal de la característica del transistor. En consecuencia, su salida es una reproducción **lineal** amplificada de la entrada. Es común decir que el amplificador clase A conduce en 360° de una onda senoidal de entrada.

Un amplificador clase B se polariza en corte de modo que cuando en el colector la entrada es cero no fluye corriente. El transistor sólo conduce la mitad de la entrada de onda senoidal. En otras palabras, conduce en 180° de una entrada de onda senoidal. Esto significa que sólo se amplifica la mitad de la onda senoidal. Por lo común, en una configuración push-pull se conectan dos amplificadores clase B de modo que la alternación positiva y la negativa se amplifican en forma simultánea.

Un amplificador clase AB se polariza cerca del corte con cierto flujo de corriente continuo del colector. Conducirá en más de 180°, pero menos de 360° de la entrada. También se usa en amplificadores push-pull y proporciona una linealidad mejor que un amplificador clase B, pero con menos eficiencia.

Los amplificadores clase A son lineales, pero no muy eficientes. Por ello son amplificadores de potencia ineficaces que se usan como amplificadores de voltaje de señales pequeñas o para amplificadores de baja potencia. Los amplificadores de aislamiento (buffers) descritos operan en clase A.

Los amplificadores clase B y clase C son más eficientes porque la corriente sólo fluye para una porción de la señal de entrada y son buenos amplificadores de potencia; la clase C es la más eficiente. Puesto que los amplificadores clase B y clase C distorsionan la señal de entrada se aplican técnicas especiales para eliminar o compensar la distorsión. Por ejemplo, los amplificadores clase B operan en una configuración push-pull, mientras que los amplificadores clase C usan una carga LC resonante para eliminar la distorsión de una señal de RF de banda angosta.

Amplificadores clase A

La figura 10-6 ilustra un amplificador de aislamiento (buffer) clase A simple. La señal del oscilador de la portadora se acopla capacitivamente a la entrada. La polarización se deriva de R_1 , R_2 y R_3 . El colector está sintonizado con un circuito resonante LC a la frecuencia de operación, y un lazo secundario acoplado inductivamente transfiere potencia a la etapa siguiente. Estos separadores o aisladores operan, por lo general, a un nivel de potencia mucho menor que 1 W.

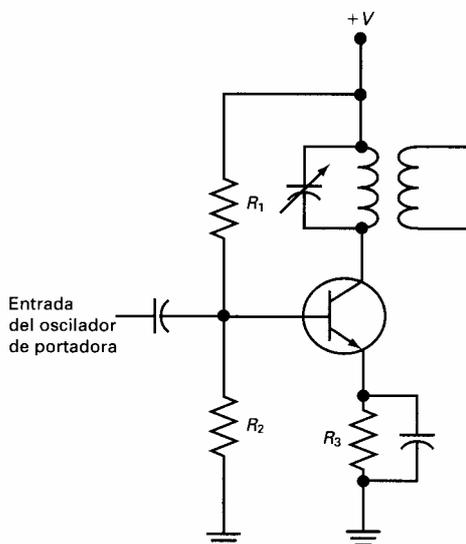


Figura 10-21 Amplificador aislador de RF clase A.

La figura 10-22 muestra un amplificador lineal clase A de alta potencia. La polarización de la base la suministra un circuito de corriente constante con compensación de temperatura. La entrada de RF de una fuente de 50 Ω se conecta a la base mediante un circuito de acoplamiento de impedancias compuesto por C_1 , C_2 y L_1 . La salida se acopla a una carga de 50 Ω a través de la red de acoplamiento de impedancia formada por L_3 , C_3 y C_4 . Cuando el transistor se conecta a un disipador térmico apropiado,

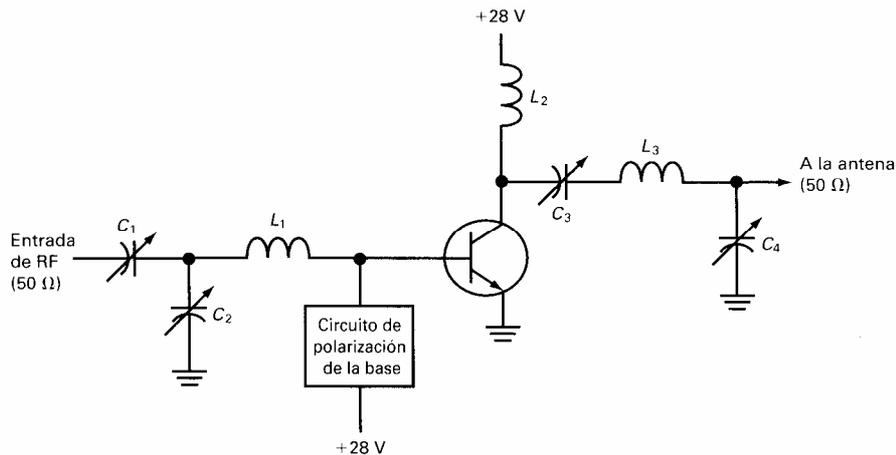


Figura 10-22 Amplificador de RF lineal clase A de alta potencia.

puede generar desde 100 W de potencia hasta casi una frecuencia de 30 MHz. El amplificador está diseñado para una frecuencia específica que se fija con los circuitos sintonizados de entrada y de salida.

Se debe tener presente que un amplificador clase A puede alcanzar una eficiencia máxima de 50%, lo cual significa que sólo la mitad de la potencia de cc se convierte en RF. La potencia restante se disipa en el transistor. Para una salida de RF de 100 W, el transistor disipa 100 W.

El circuito de un amplificador de potencia en clase A con emisor a tierra (figura 10.23.a) es semejante al del amplificador análogo en señal débil. En una aplicación del AP, la resistencia de la carga es por lo general lo suficientemente pequeña para que los efectos de la resistencia y reactancia de derivación del dispositivo sean insignificantes. Como el punto Q (de reposo) (es decir, I_{CQ}) se selecciona para conservar siempre al transistor en su región activa, el dispositivo equivale a una fuente de corriente. (figura 10.23 b). El circuito sintonizado paralelo o el filtro equivalente no es una parte necesaria de un amplificador en clase A. Sin embargo, como ningún dispositivo es perfectamente lineal, se incluye a menudo un circuito sintonizado o un filtro para evitar que las corrientes armónicas alcancen la carga.

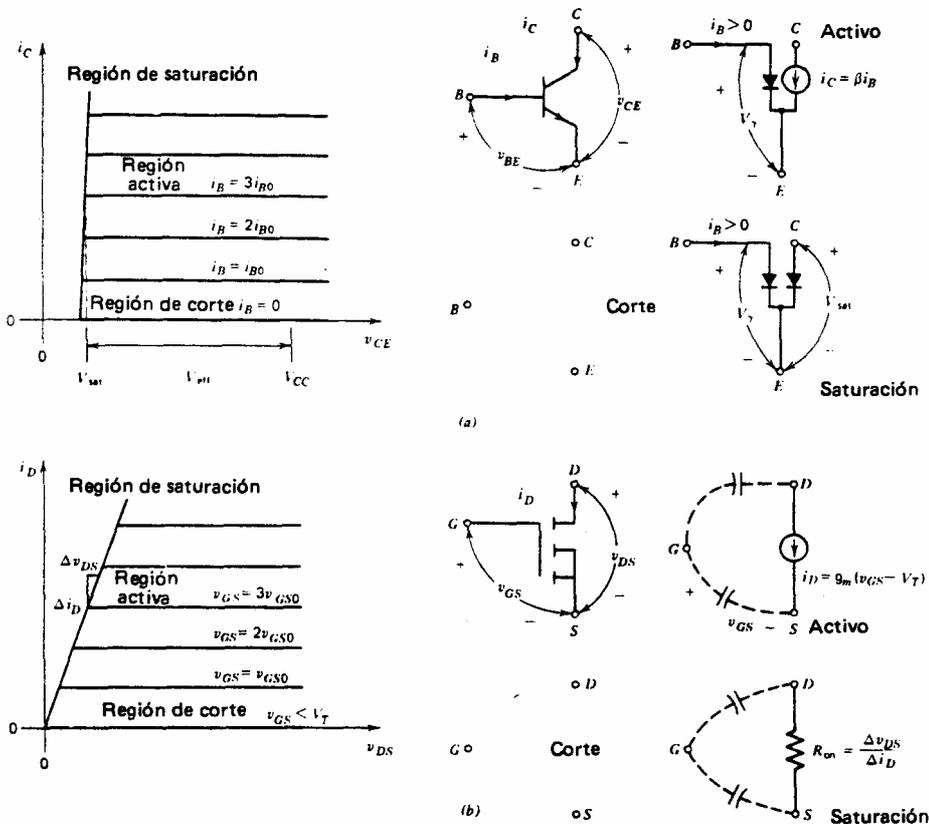


Figura 10.23 Características y modelos simplificados de dispositivos; a) transistor de unión bipolar (BJT); b) transistor de efecto de campo VMOS (FET)

En el amplificador de la figura 10-23 a), la señal de excitación y la polarización aplicadas se supone que producen la corriente de colector $i_c(\theta)$ mostrada en la figura 10.23c:

$$i_c(\theta) = I_{CQ} - I_{cm} \text{sen} \theta \quad (10-2)$$

Las componentes armónicas de $i_c(\theta)$ se omiten en (10.2) porque generalmente tienen poco efecto sobre la potencia o eficiencia de un amplificador clase A. Las componentes de c.c. y a.c. de $i_c(\theta)$ deben fluir a través de la bobina de RF (RFC) y por el capacitor de bloqueo (Cb), respectivamente y por lo tanto, convertirse en la corriente de entrada

$I_{dc} = I_{CQ}$ y en la de salida $i_o(\theta) = I_{cm} \text{sen} \theta$, respectivamente. Las corrientes armónicas producidas por la no linealidad del dispositivo, se envían a tierra a través del circuito sintonizado paralelo. Cualquier componente de frecuencia de portadora de $i_c(\theta)$ fluye a través de la resistencia de carga R (suponiendo una sintonización adecuada del circuito paralelo sintonizado y efectos insignificantes provenientes de la RFC y del Cb) y produce un voltaje de salida

$$v_o(\theta) = I_{cm} R \text{sen} \theta = V_{om} \text{sen} \theta \quad (12-3)$$

El voltaje de colector debe tener una componente de c.c. igual al voltaje de alimentación y una de a.c. igual al voltaje de salida; así

$$v_c(\theta) = V_{cc} + V_{om} \text{sen} \theta = V_{cc} + V_{cm} \text{sen} \theta \quad (12-4)$$

Como la operación en fuente de corriente del dispositivo puede mantenerse sólo cuando $v_c(\theta)$ es positivo, es necesario limitar el voltaje de salida V_{om} a valores menores que V_{cc} . (Realmente, el valor máximo V_{om} debe ser ligeramente menor que V_{cc} , debido a los efectos de saturación. Como la corriente de colector $i_c(\theta)$ debe ser similarmente positiva, $I_{dc} = I_{CQ}$ se hace por lo común igual o ligeramente mayor que la corriente de salida pico I_{om} , $= V_{om}/R < V_{cc}/R$. Consecuentemente la potencia de entrada es

$$P_i = V_{cc} I_{dc} = \frac{V_{cc}^2}{R} \quad (12-5)$$

la de salida

$$P_o = \frac{V_{om}^2}{2R} \leq \frac{V_{cc}^2}{2R} \quad (12-6)$$

y la eficiencia

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_{om}^2}{2V_{cc}^2} \leq \frac{1}{2} \quad (10-7)$$

La potencia P_d disipada en el transistor es la diferencia entre P_i y P_o .

Un buen diseño supondrá el valor máximo de $P_d = P_i$; para permitir condiciones de no señal o señal reducida.

La observación de las formas de onda de la figura 10.24 c) muestra que cuando el AP clase A está entregando su salida máxima, el voltaje y corriente de colector máximos son $v_{c,máx} = 2 V_{CC}$ e $i_{c,máx} = 2 I_{CQ} = 2 V_{cc}/R$. La capacidad de salida de potencia normalizada es, por lo tanto,

$$P_{máx} = \frac{P_{o,máx}}{v_{c,máx} i_{c,máx}} = \frac{\frac{V_{cc}^2}{2R}}{(2V_{cc})(2V_{cc}/R)} = \frac{1}{8} \quad (12-8)$$

Si se combinan dos dispositivos operando en clase A en una configuración complementaria o configuración contra-fase la $P_{máx} = 1/4$. Este arreglo cancela la mayoría de las corrientes armónicas pares generadas por la no linealidad del dispositivo.

Los amplificadores de potencia de RF en clase A se usan más comúnmente como amplificadores de excitación en bajo nivel.

En estas aplicaciones, la potencia consumida por el amplificador clase A es una porción relativamente pequeña de la potencia total del transmisor. Los AP clase A se utilizan también en frecuencias de microondas, donde resulta difícil emplear otras clases de amplificación.

Ejemplo 10.1.1. Diseñar (especificando valores componentes y rangos) la porción de salida de un AP clase A que entrega 1 W sobre una carga de 50Ω en $f = 10$ Mhz con un voltaje de alimentación de + 12V: primero el voltaje de salida pico de RF (de acuerdo a 12.6) es $V_{om} = (2RP_o)^{1/2} = 10V$. La corriente de salida de RF pico es entonces $I_{cm} = V_{om}/R = 200$ m A, por lo que $I_{dc} = 200$ m A, $P_i = 12(0.2) = 2.4$ W, y $\eta = 1/2.4 = 41.7$ %. Las especificaciones pico del dispositivo son $V_{C, máx} = 12 + 10 = 22$ V; $v_{C, máx} = 200 + 200 = 400$ mA. Durante la operación normal, $P_d = 2.4 - 1 = 1.4$ W; no obstante, para permitir operación segura con amplitud de señal reducida, el disipador de calor debe disipar $P_d = P_i = 2.4$ W. Para $Q = 5$, $X_{L_o} = X_{C_o} = 50/5 = 10$, por lo que $0,159 \mu H$ y $C_o = 1592$ pF. La reactancia de la RFC

debe ser cuando menos $10R$, para minimizar su efecto en el circuito, por lo que $RFC \geq 8 \mu H$. De manera similar para $X_{Cb} \leq R/10$, $C_b \geq 3200 \text{ pF}$.

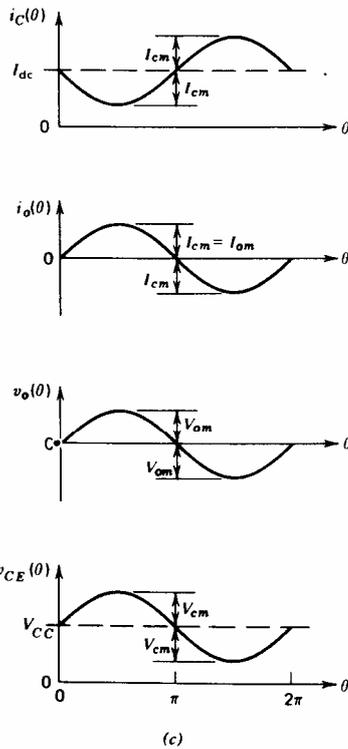
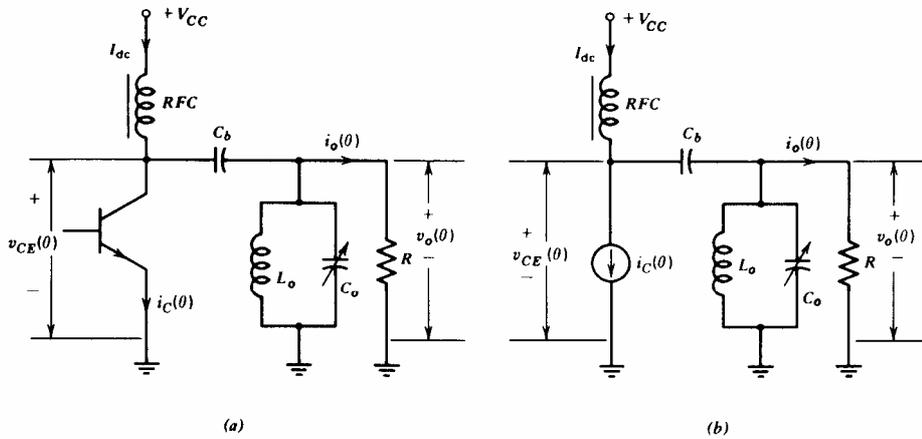
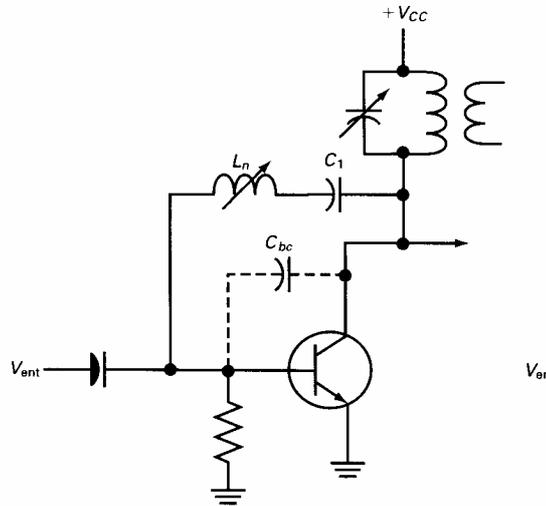


Figura 10.24 Amplificador clase A: a) circuito; b) circuito equivalente; c) formas de onda

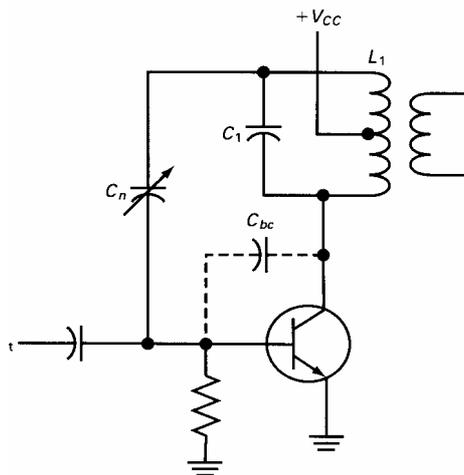
Neutralización

Un problema que presentan todos los amplificadores de RF es la autooscilación. Cuando parte del voltaje de salida encuentra cómo regresar a la entrada del amplificador con la amplitud y la fase correctas, el amplificador puede oscilar. El amplificador lo puede hacer a su frecuencia sintonizada o, en algunos casos, a una frecuencia mucho más alta. Cuando el circuito oscila a una frecuencia más alta no relacionada con la frecuencia sintonizada, la oscilación se conoce como oscilación parásita (Miller, etc). En cualquiera de los dos casos, la oscilación es indeseable e impide la amplificación o, si es oscilación parásita, reduce la potencia de amplificación e introduce distorsión en la señal.

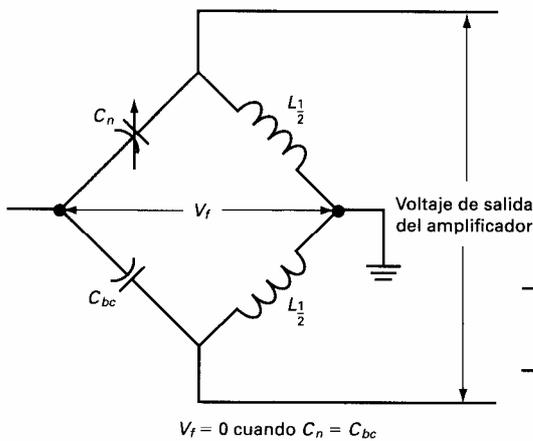
La autooscilación de un amplificador suele ser el resultado de una realimentación positiva que ocurre debido a la *capacitancia* entre elementos del dispositivo de amplificación, sea éste un transistor bipolar, un FET o un tubo al vacío. En un transistor bipolar es la capacitancia C_{bc} de colector a base, como muestra la figura 10-25a). Los amplificadores a transistores se polarizan de modo que la unión emisor-base tiene polarización directa y la unión base-colector, polarización inversa. Una juntura PN con polarización inversa de un diodo o transistor actúa como capacitor.



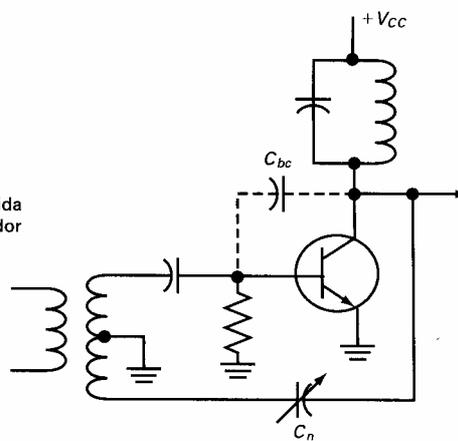
a) Cancelación del efecto de C_{bc} con una inductancia equivalente, L_n



b) Neutralización mediante un inductor de colector con derivación y un capacitor neutralizante, C_n



c) Circuito equivalente al que muestra b)



d) Neutralización con un inductor de entrada con derivación

Figura 10-25 Circuitos de neutralización.

Esta pequeña capacitancia permite que la salida del colector se realimente a la base. Dependiendo de la frecuencia de la señal, del valor de la capacitancia y de los valores de las inductancias y las capacitancias parásitas en el circuito, la realimentación de la señal puede estar en fase con la señal de entrada y tener una amplitud lo suficientemente alta para producir oscilación.

Esta capacitancia entre elementos no puede eliminarse; por lo tanto, es necesario compensar su efecto. Este proceso se llama neutralización. El concepto de neutralización consiste en realimentar a través de C_{bc} otra señal con la misma amplitud que la señal realimentada y con un desfase de 180° con ella. El resultado será la cancelación recíproca de las dos señales.

La figura 10-25 presenta varios métodos de neutralización. En a), el inductor L_n proporciona una señal con la misma fase pero opuesta. El capacitor C_1 es un capacitor de valor elevado que sólo se usa para bloquear la cc a fin de impedir que el voltaje del colector se aplique a la base. La L_n es ajustable para que su valor se pueda fijar y hacer que su reactancia sea igual a la reactancia de C_{bc} a la frecuencia de oscilación. De esta forma, C_{bc} y L_n forman un circuito resonante paralelo que actúa como una resistencia muy alta en la frecuencia resonante. El resultado es la cancelación efectiva de la realimentación positiva.

En b) se muestra otro tipo de neutralización en la que se utiliza un inductor de colector con derivación y un capacitor neutralizante, C_n . Las dos mitades iguales de la inductancia del colector, la capacitancia de la unión C_{bc} y C_n , forman un circuito puente, como se ilustra en c). Cuando C_n se ajusta para ser igual a C_{bc} el puente está balanceado y no aparece ninguna señal de realimentación, V_f . Una variante de este circuito se muestra en d), donde se ve que se usa un inductor de entrada con derivación central.

Amplificadores clase B

La mayoría de los transistores de potencia de RF tienen un límite de potencia alto, de varios cientos de vatios. Para producir más potencia pueden conectarse dos o más dispositivos en paralelo. La figura 10-9 muestra un amplificador de potencia lineal clase B en configuración push-pull. La señal de excitación de RF se aplica a Q_1 y Q_2 a través del transformador de entrada, T_1 y proporciona a Q_1 y Q_2 señales de acoplamiento de impedancias y de excitación, desfasadas 180° . Un transformador de salida, T_2 , acopla la potencia a la antena o carga. La polarización la proporcionan R_1 y D_1 .

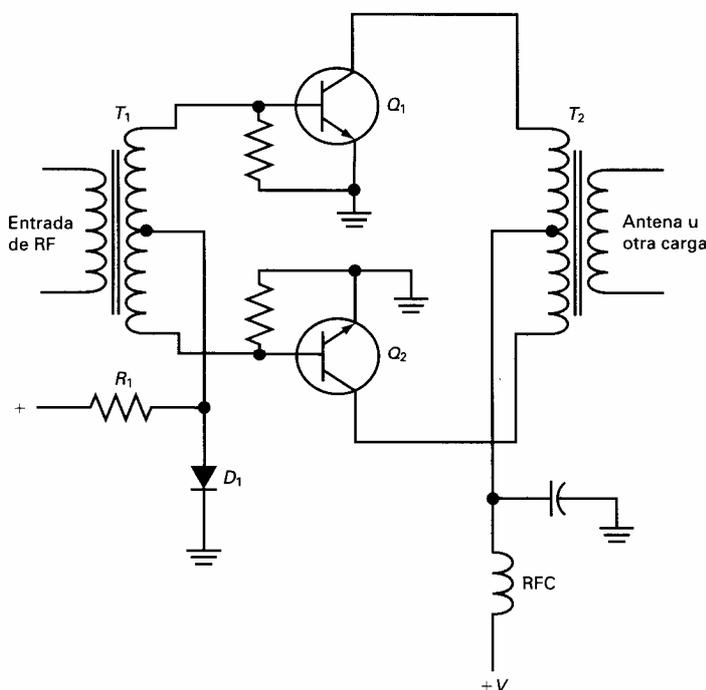


Figura 10-26 Amplificador de potencia de RF lineal clase B de banda ancha.

Para la operación clase B, Q_1 y Q_2 deben polarizarse justo en el punto de corte. La unión emisor-base de un transistor no conducirá hasta que se apliquen aproximadamente 0.10 a 0.8 V de polarización directa debido a la barrera de potencial interna. Este efecto escalón hace que los transistores se polaricen después del corte, no justo cuando éste ocurre. Esto se usa para poner a Q_1 y Q_2 justo en el umbral de conducción.

Ahora bien, cuando ocurre el semiciclo positivo de la entrada de RF, la base de Q_1 será positiva y la de Q_2 , negativa; Q_2 esta-

rá desconectado, pero Q_1 conducirá y amplificará el semiciclo positivo. En la mitad superior de T_2 fluye corriente del colector, la cual induce un voltaje de salida en el secundario.

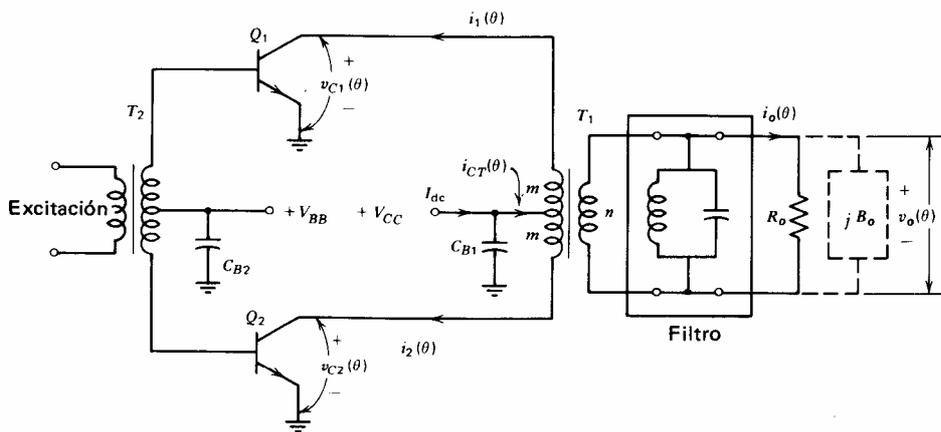
En el semiciclo negativo de la entrada de RF la base de Q_1 es negativa, por lo que queda inactivo. La base de Q_2 es positiva, y esto hace que Q_2 amplifique el semiciclo negativo. En Q_2 y la mitad inferior de T_2 fluye corriente completando así un ciclo. La potencia se distribuye entre los dos transistores.

El circuito de la figura 10-9 es de banda ancha, es decir, no sintonizado y amplificará señales en un amplio intervalo de frecuencias. Un intervalo típico puede ser de 2 MHz a 30 MHz. Se generaría así aparte una señal de AM o de

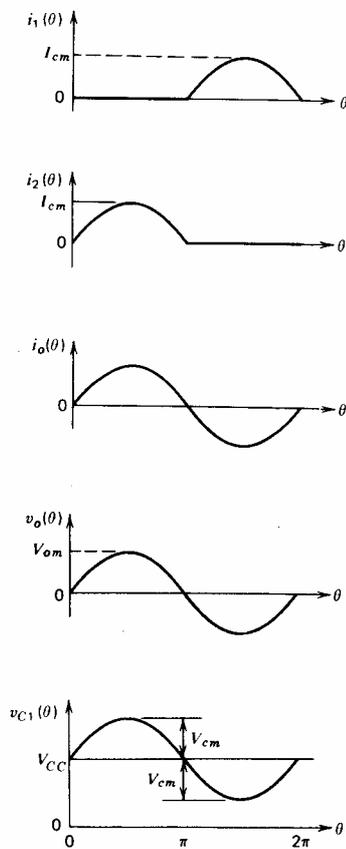
BLU de baja potencia a la frecuencia deseada y después se aplicaría a este amplificador de potencia para enviarla a la antena. Con circuitos en push-pull son posibles niveles de potencia de hasta varios cientos de watts.

La figura 10-10 ilustra otro amplificador de potencia de RF en push-pull. Éste usa dos MOSFET de potencia, puede producir una salida de hasta 1 kW en el intervalo de 10 MHz a 90 MHz y tiene una ganancia de potencia de 12 dB. La potencia de excitación de entrada de RF debe ser de 103 W para producir la salida completa de 1 kW. En la entrada y salida se usan transformadores toroidales para acoplar las impedancias que proporcionan operación de banda ancha en el intervalo de 10 MHz a 90 MHz sin sintonización. Los inductores de 20 nanohenrios (nH) y los resistores de 20 ohms forman circuitos de neutralización que proporcionan realimentación desfasada desde la salida hasta la entrada para impedir la autooscilación.

Cuando los transistores están en la región activa, son esencialmente fuentes de corriente. La alta eficiencia puede atribuirse a la corriente de colector nula en los transistores cuando sus voltajes de colector son los más altos.



(a)



(b)

Figura 10.27 Amplificador clase B; a) circuito y b) formador de onda

Es importante observar que en la amplificación clase B, ningún dispositivo por sí mismo produce una réplica amplificada de la entrada de amplificador. Se secciona la señal, es amplificada eficientemente y después reensamblada.

Supongamos que los dispositivos son perfectamente lineales y que cada uno es una fuente de corriente de media senoide con amplitud pico I_{cm} (figura 10.27 b). Durante un medio ciclo dado, sólo un medio del devanado primario del transformador T1 lleva corriente. La transformación de la corriente en m vueltas del primario a n del secundario, produce una corriente de salida sinusoidal

$$i_o(\theta) = \frac{m}{n} I_{cm} \text{sen}\theta \tag{10-9}$$

que a su vez da lugar a un voltaje de salida

$$v_o(\theta) = \frac{m}{n} I_{cm} R_o \text{sen}\theta = V_{om} \text{sen}\theta \tag{10-10}$$

La transformación de este voltaje al devanado primario da la forma de onda de voltaje de colector

$$v_{c1}(\theta) = V_{CC} + V_{cm} \text{sen}\theta \tag{10-11}$$

donde la oscilación del voltaje de colector es

$$v_{cm} = \frac{m}{n} V_{om} = \frac{m^2}{n^2} I_{cm} R_o = I_{cm} R \tag{10-12}$$

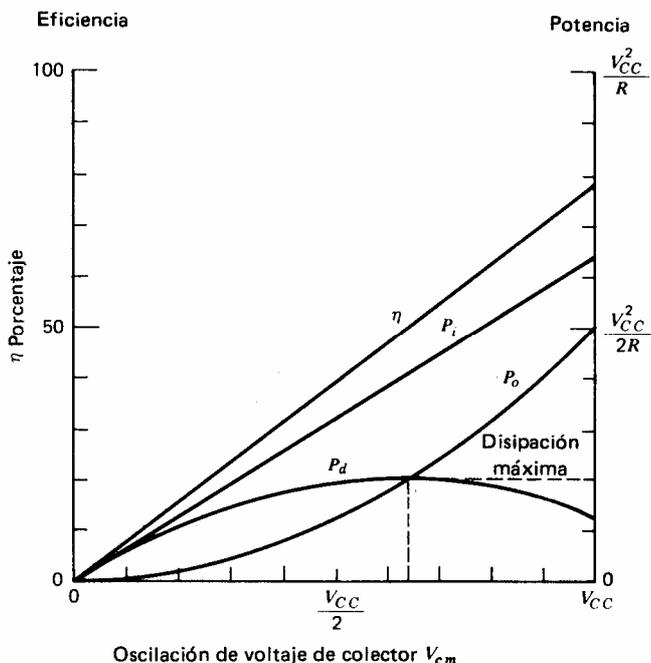
En la expresión anterior, R es la resistencia vista a través de la mitad del devanado primario, con la otra mitad abierta.

Mantener un voltaje de colector negativo requiere que $V_{cm} \leq V_{CC}$, limitando así la potencia de salida a

$$P_o = \frac{V_{cm}^2}{2R} \leq \frac{V_{CC}^2}{2R} = \frac{V_{CC}^2}{2(m^2/n^2)R_o} \tag{10-13}$$

La corriente $i_{CT}(\theta) = I_{cm} |\text{sen}\theta|$ de derivación central es la suma de las dos corrientes de colector, y la corriente I_{dc} de entrada es la componente de c.c. de la corriente de derivación central; así,

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{CT}(\theta) d\theta = \frac{2I_{cm}}{\pi} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{cm}}{R} \tag{10-14}$$



La eficiencia en este caso es

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\pi V_{cm}}{4V_{CC}} \leq \frac{\pi}{4} \approx 0,785 \tag{10-15}$$

Como el voltaje pico de colector es $V_{CC} + V_{cm} = 2 V_{CC}/\pi$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{V_{CC}^2/2R}{(2V_{CC})(V_{CC}/R)} = \frac{1}{4} \tag{10-16}$$

La potencia (P_d) disipada en cada dispositivo en un medio de la diferencia entre P_i y P_o . La disipación máxima en cada transistor es

$$P_{d1,m\acute{a}x} = P_{d2,m\acute{a}x} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R} \tag{10-17}$$

y tiene lugar cuando $V_{cm} = 2V_{CC}/\pi$ (ver figura 12.6).

Ejemplo 10.2.1. Diseñar un amplificador clase B para entregar 25 W a una carga de 50 Ohms, usando una alimentación de c.c. que tenga $V_{CC} = 28V$. Las redes de acoplamiento sintonizadas no van a usarse: de (10.13),

$R \leq 28^2 / (2 \times 25) = 15.7$ ohms. El valor más conveniente de R es 12.5 Ohms, obtenido con $m/n = 2$. Para obtener 25 W, $V_{cm} = \sqrt{2RP_o} = \sqrt{2 \times 12.5 \times 25} = 25V$.

Entonces $I_{cm} = V_{cm} / R = 2$ A, $I_{dc} = 2I_{cm} / \pi = 1.27$ A, $P_{i-} = 1.27 \times 28 = 35.6W$. De aquí, $\eta = 25 / 35.6 = 70.1$ por ciento, y la disipación máxima de colector en cada dispositivo es $(28)^2 / (\pi^2 \times 12.5) = 6.35W$ según (10.17). Los transistores deben soportar voltajes pico de $28 + 25 = 53V$ y corrientes pico de colector de 2A.

Combinadores de potencia.

Con un amplificador clase B que utiliza un MOSFET de alta potencia es posible alcanzar niveles de potencia hasta de casi de 1 Kw. Si se necesita más potencia, hay dos soluciones: usar un tubo al vacío de alta potencia o combinar la potencia de dos o más amplificadores de potencia de estado sólido. Si bien los tubos al vacío siguen usándose para niveles de potencia muy altos, el método del combinador de potencia se ha convertido en el preferido para alcanzar niveles de potencia muy altos en el equipo moderno de comunicaciones.

Un combinador de potencia es un transformador de banda ancha que se realiza con varias vueltas de conductor grueso sobre un núcleo toroidal de ferrita. Los devanados primario y secundario se hacen

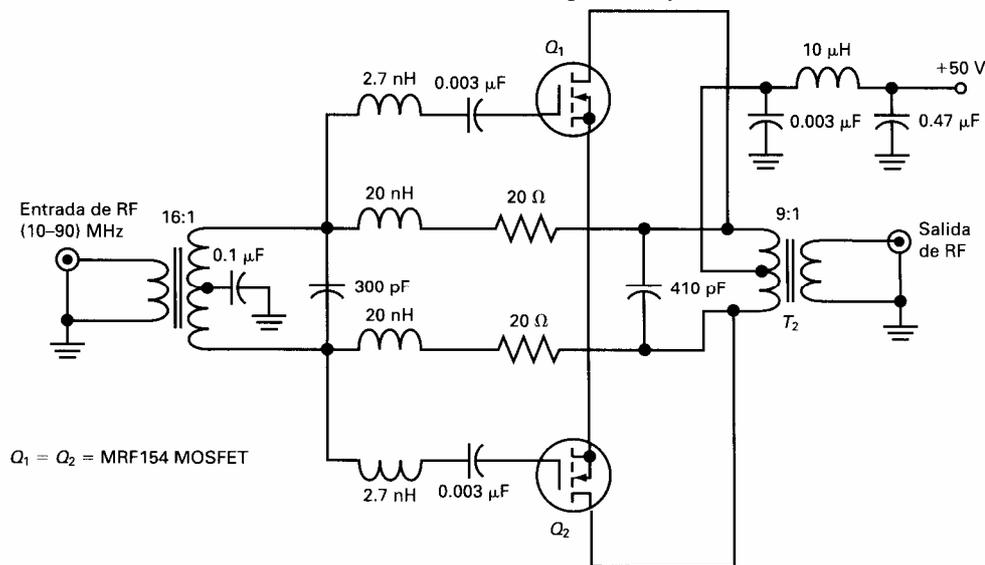


Figura 10-28 Amplificador de potencia de RF en push-pull de 1 kW que utiliza MOSFET.

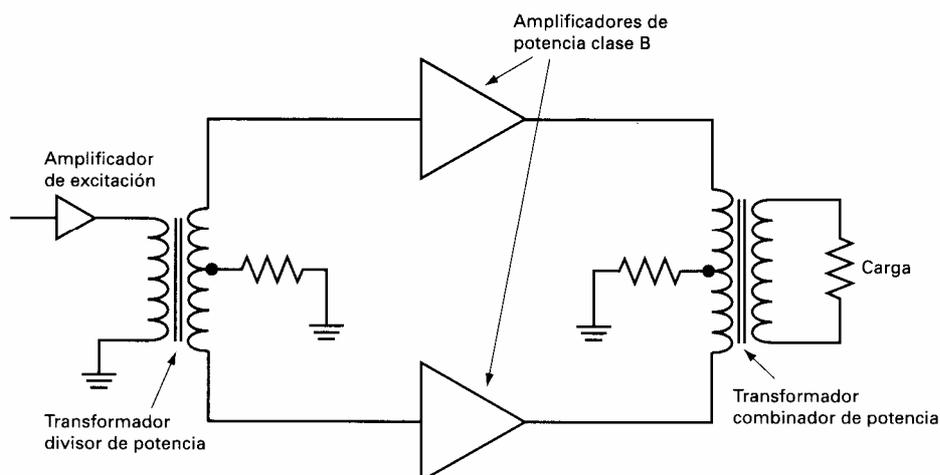


Figura 10-29.-Obtención de alta potencia de salida con amplificadores de estado sólido y transformadores combinadores de potencia.

con dos porciones de alambre adosados o trenzados para formar una especie de línea de transmisión. Los alambres se arrollan juntos sobre el núcleo. A esto se llama devanado bifilar. El dispositivo resultante se denomina transformador tipo línea de transmisión o *balun*, ya que usa los efectos de tal línea para conseguir el acoplamiento de las impedancias.

La figura 10-29 indica cómo usar el combinador de potencia. Los triángulos representan dos amplificadores de potencia clase B. Sus salidas se aplican al transformador combinador con un desfase de 180° . Las señales de salida se suman en fase, y la potencia combinada aparece a través de la carga.

En la figura 10-29 también se observa un transformador divisor de potencia en las entradas de los amplificadores de potencia. El transformador divide en partes iguales la potencia de la etapa de excitación. El transformador divisor también es un transformador de línea de transmisión como el combinador de salida. Para una potencia todavía mayor, pueden combinarse cuatro o más amplificadores de esta manera.

Amplificadores clase C

El circuito clave en la mayoría de los transmisores de AM y FM es el amplificador clase C. Se usa para amplificación de potencia en elementos como excitadores, multiplicadores de frecuencia y amplificadores finales.

Un amplificador clase C se polariza de modo que conduce menos de 180° de la señal de entrada. Suele tener un ángulo de conducción de 90° a 150° , lo cual significa que la corriente fluye a través de él en impulsos cortos. Entonces, la cuestión es: "*¿Cómo se amplifica una señal completa?*" Como se verá más adelante, para ese fin se usa un circuito sintonizado resonante.

La figura 10-30a) describe cómo polarizar un amplificador clase C: la base del transistor simplemente se conecta a tierra a través de un resistor o choque de RF. No se aplica ningún voltaje de polarización externo, sino que a la base se aplica en forma directa la señal de RF por amplificar. El transistor conducirá en los semiciclos positivos de la onda de entrada y queda en corte en los semiciclos negativos. Por lo común, se piensa que se trata de un amplificador clase B. Recordemos que la unión emisor-base de un transistor bipolar tiene un umbral de voltaje directo de casi 0.7 V. En otras palabras, la unión emisor-base de hecho no conduce hasta que la base sea más positiva que el emisor en +0.7 V. Debido a esto, el transistor cuenta con una polarización inherente. Cuando se aplica la señal de entrada, la corriente del colector no fluye hasta que la base sea positiva en 0.7 V (figura 10-30b). El resultado es que la corriente del colector pasa por el transistor en pulsos positivos en menos de los 180° totales de los semiciclos positivos de *ca*.

En muchas etapas de excitación y multiplicación de potencia baja no se requiere otra disposición especial de polarización más que el voltaje inherente de la unión emisor-base. El resistor entre la base y tierra sólo proporciona una carga para el circuito excitador.

En algunos casos quizá sea necesario un ángulo de conducción más reducido que el que proporciona el circuito de la figura 10-30a). Entonces debe aplicarse alguna forma de polarización. Una manera simple de polarizar es con la red RC que muestra la figura 10-31a), donde la señal que se va a amplificar se aplica a través del capacitor C_1 . Cuando la unión emisor-base conduce en el semiciclo positivo, C_1 se cargará hasta el pico del voltaje aplicado, menos la caída directa a través de la unión emisor-base. En el semiciclo negativo de la entrada, la unión emisor-base, desde luego, tendrá polarización inversa, por lo que el transistor no conduce. Sin embargo, durante este lapso el capacitor C_1 se descargará a través de R_1 .

Esto produce un voltaje negativo en R_1 que sirve como polarización inversa para el transistor. Mediante el ajuste apropiado de la constante de tiempo de R_1 y C_1 , se establecerá un voltaje medio de cc de polarización inversa. El voltaje que se aplica hará que el transistor conduzca, pero sólo en los picos. Cuanto más alto sea el voltaje medio de cc de polarización, más cerrado será el ángulo de conducción y más corta la duración de los pulsos de corriente del colector. Este método se conoce como *polarización de señal*.

Desde luego, también es posible suministrar polarización negativa a un amplificador clase C con un voltaje de alimentación de cc fijo, como muestra la figura 10-31a).

Después de determinar el ángulo de conducción deseado, puede establecerse el valor del voltaje inverso que se aplica a la base a través de la RFC. La señal de entrada se acopla luego a la base y hace que el transistor conduzca sólo en los picos de los semiciclos positivos de la entrada. Esto se conoce como *polarización externa*, pero requiere una alimentación de cc negativa por separado.

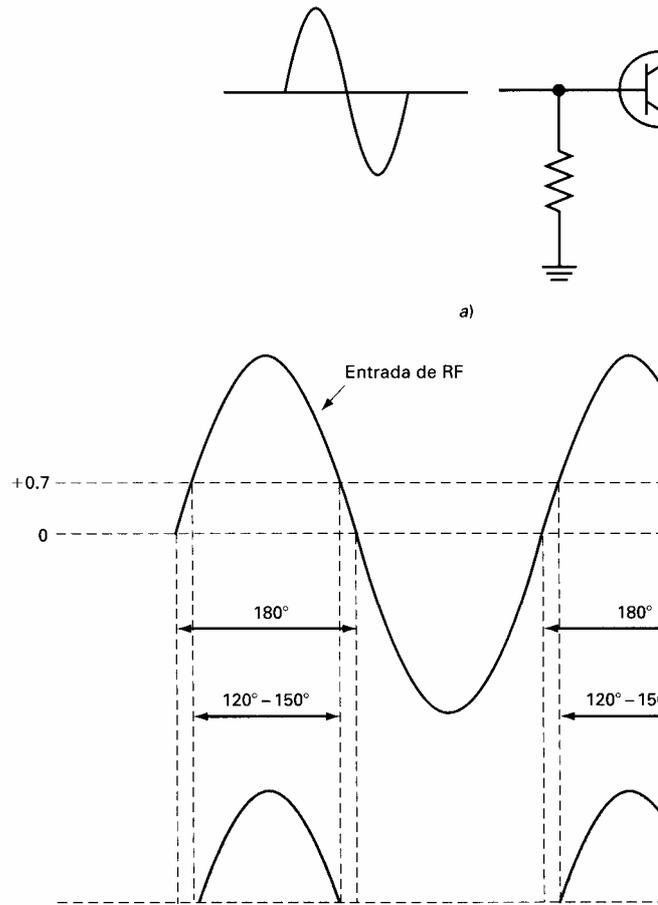
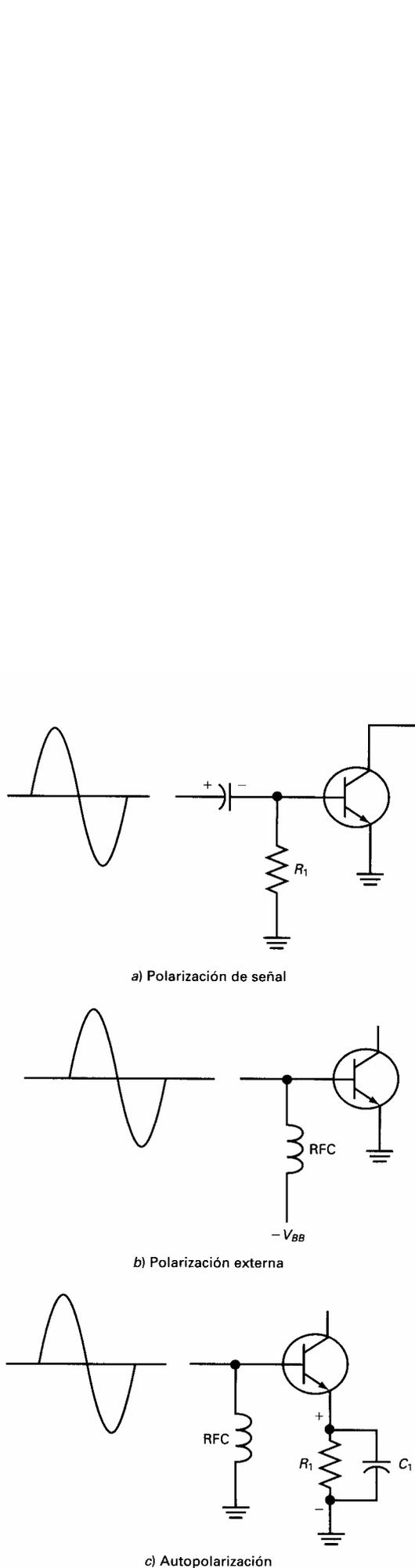


Figura 10-31 Uso del umbral emisor-base interno para polarización clase C.

La figura 10-31c) muestra otro método de polarización. Tal efecto también se deriva de la señal como se ve en la figura 10-31a). Esta configuración se conoce como método de *autopolarización*. Cuando en el transistor fluye corriente, se desarrolla un voltaje a través de R_1 . El capacitor C_1 se carga y mantiene constante el voltaje. Esto hace que el emisor sea más positivo que la base, lo que equivale a tener un voltaje negativo en ella. Para una operación correcta se requiere una señal de entrada intensa.

Todos los amplificadores clase C tienen alguna forma de circuito sintonizado conectado en el colector, como muestra la figura 10-32. La finalidad principal de este circuito sintonizado es formar la salida de onda senoidal de ca completa. Un circuito sintonizado paralelo oscilará a su frecuencia resonante siempre que reciba un pulso de cc. El pulso cargará el capacitor, el que, a su vez, se descargará en el inductor. El campo magnético en el inductor se incrementará y después se colapsará, produciendo la inducción de un voltaje. Este voltaje inducido recarga entonces al capacitor en dirección opuesta. Este intercambio de energía entre inductor y capacitor se llama el efecto de volante y produce una onda senoidal atenuada a la frecuencia resonante.

Figura 10-31 Métodos de polarización de un amplificador clase C.

Si el circuito resonante recibe un pulso de corriente cada ciclo, el voltaje en el circuito sintonizado será una onda senoi-

dal de amplitud constante a la frecuencia resonante. Aun cuando la corriente fluye por el transistor en pulsos cortos, la salida del amplificador clase C será una onda senoidal continua. El circuito sintonizado en el colector también tiene otra finalidad, que es eliminar las armónicas no deseadas. Una señal no senoidal, como una onda cuadrada o los pulsos cortos que fluyen a través del amplificador clase C, constan de una onda senoidal fundamental y múltiples armónicas. Los pulsos cortos en un amplificador clase C se componen de armónicas de orden segundo, tercero, cuarto, quinto, etcétera. En un transmisor de alta potencia las señales serán radiadas a estas frecuencias armónicas así como a la frecuencia resonante fundamental. Esta radiación de armónicas puede causar interferencia fuera de banda. La finalidad del circuito sintonizado es actuar como un filtro selectivo que eliminará estas armónicas de orden superior. Si el valor Q del circuito sintonizado se hace lo suficientemente grande, las armónicas se suprimirán en forma adecuada.

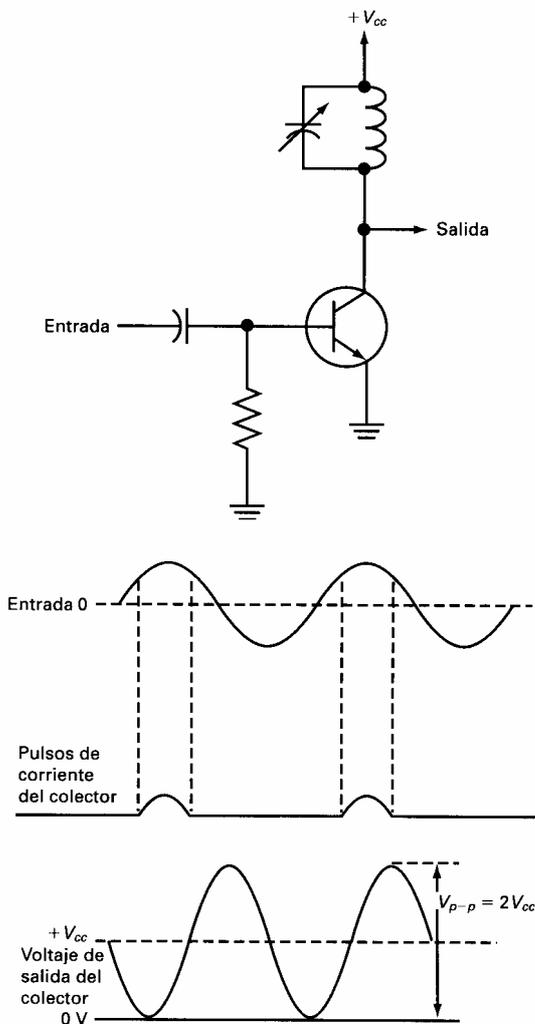


Figura 10-32 Operación del amplificador clase C.

Es importante señalar que Q en el circuito sintonizado es un aspecto importante en un amplificador clase C. Recordemos que el ancho de banda (BW) de un circuito sintonizado y su Q están relacionados por la expresión

$$BW = \frac{f_r}{Q} \quad \text{o} \quad Q = \frac{f_r}{BW}$$

El valor Q del circuito sintonizado en el amplificador clase C debe seleccionarse de modo que proporcione la atenuación adecuada de las armónicas y tenga, a la vez, un ancho de banda apropiado para dejar pasar las bandas laterales que origina el proceso de modulación. Si el Q del circuito sintonizado es demasiado alto, el ancho de banda será muy estrecho y se eliminará una parte de las bandas laterales de las frecuencias más altas. Esto ocasionará una forma de distorsión de frecuencia llamada recorte de bandas laterales, la cual puede hacer ininteligibles las señales o, por lo menos, limitará la fidelidad de la reproducción.

Una de las razones principales por las que se prefieren los amplificadores clase C para la amplificación de potencia de RF sobre los amplificadores clase A y clase B, es que los elementos clase C tienen eficiencia alta. Debido a que la corriente fluye durante menos de 180° del ciclo de entrada de ca, la corriente promedio en el transistor es bastante baja, lo cual significa que la potencia que disipa el dispositivo también es baja. Un amplificador clase C funciona casi como un transistor conmutado cerrado en más de 180° del ciclo de entrada. El interruptor conduce aproximadamente en 90°

a 150° del ciclo de entrada. Durante el tiempo en que lo hace, su impedancia de emisor a colector es muy baja. Aun cuando la corriente pico sea alta, la disipación total de potencia es mucho menor que en los circuitos clase A y clase B. Por ello, una mayor cantidad de la potencia de cc se convierte en energía de RF y se hace llegar hasta la carga, en general mediante una antena. La eficiencia de la mayoría de los amplificadores clase C está en el intervalo de 100% a 85%.

Al analizar la potencia en un amplificador clase C, se encuentra que hay potencia de entrada y potencia de salida. La de entrada es la potencia promedio que consume el circuito; es simplemente el producto del voltaje de alimentación y la corriente media del colector:

$$P_{ent} = V_{cc} I_c$$

Por ejemplo, si el voltaje de alimentación es de 13.5 V y la cc media del colector de 0.7 A, la potencia de entrada es

$$P_{ent} = 13.5(0.7) = 9.45 \text{ W}$$

La potencia de salida es, desde luego, la potencia que en realidad se transmite a la carga. La cantidad de potencia real depende de la eficiencia del amplificador. La potencia de salida puede calcularse con la expresión usual:

$$P_{sal} = \frac{V^2}{R_L}$$

Aquí, V es el voltaje de salida de RF en el colector del amplificador y RL, la impedancia de carga. Cuando un amplificador clase C se ajusta y opera en forma correcta, el voltaje de salida de RF pico a pico es dos veces el voltaje de alimentación, o sea, 2Vcc.

La topología de circuito del amplificador de potencia clásico C es la misma que la del amplificador clase A. El dispositivo activo está también energizado para operar como fuente de corriente. Sin embargo, la forma de onda de corriente que produce no es (aun en la ausencia de no linealidades de dispositivo) la corriente sinusoidal deseada en la carga. La forma de onda de corriente puede tener una amplia variedad de conformaciones, aunque casi siempre se configura como una onda sinusoidal polarizada. Así, esta forma de onda de corriente de drenaje (figura 10.33b) es parte de una onda sinusoidal cuando el dispositivo está activo y cero cuando está en corte. Observar que la corriente IDQ (análoga a la corriente estática en un AP clase A o B) es negativa en un AP clase C, mientras que la corriente IDD (producto de la excitación) es positiva.

$$\begin{aligned} i_D(\theta) &= I_{DQ} - I_{DD} \text{sen} \theta, & I_{DQ} - I_{DD} \text{sen} \theta &\geq 0 \\ i_D(\theta) &= 0, & I_{DQ} - I_{DD} \text{sen} \theta &< 0 \end{aligned} \quad (10-1)$$

La parte del ciclo de RF en que el dispositivo pasa en su región activa se llama ángulo de conducción y se representa aquí por 2y. El ángulo de conducción se relaciona con la magnitud de la corriente de polarización IDQ y con la de la corriente de excitación IDD por

$$\begin{aligned} y &= 0, I_{DD} + I_{DQ} < 0 \text{ (Corte de transistor)} \\ y &= \pi, I_{DQ} - I_{DD} > 0 \text{ (Operación clase A)} \\ y &= \arccos(I_{DQ}/I_{DD}) \text{ de otro modo (op clase B o C)} \end{aligned} \quad (10-2)$$

Inversamente, la polarización se puede escribir como función de una excitación y de un ángulo de conducción como

$$I_{DQ} = -I_{DD} \cos y \quad (10-3)$$

Observe que estas expresiones incluyen a las clases A (y = π) y B (y = π/2), así como a la C, que se define por la conducción en menos de un medio del ciclo de RF (y < π/2).

La corriente de alimentación Idc, requerida con esta forma de onda de corriente de drenaje es un componente c.c.:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_D(\theta) d\theta = \frac{1}{\pi} (I_{DQ} y + I_{DD} \text{sen} y) = \frac{I_{DD}}{\pi} (\text{sen} y - y \cos y) \quad (10-4)$$

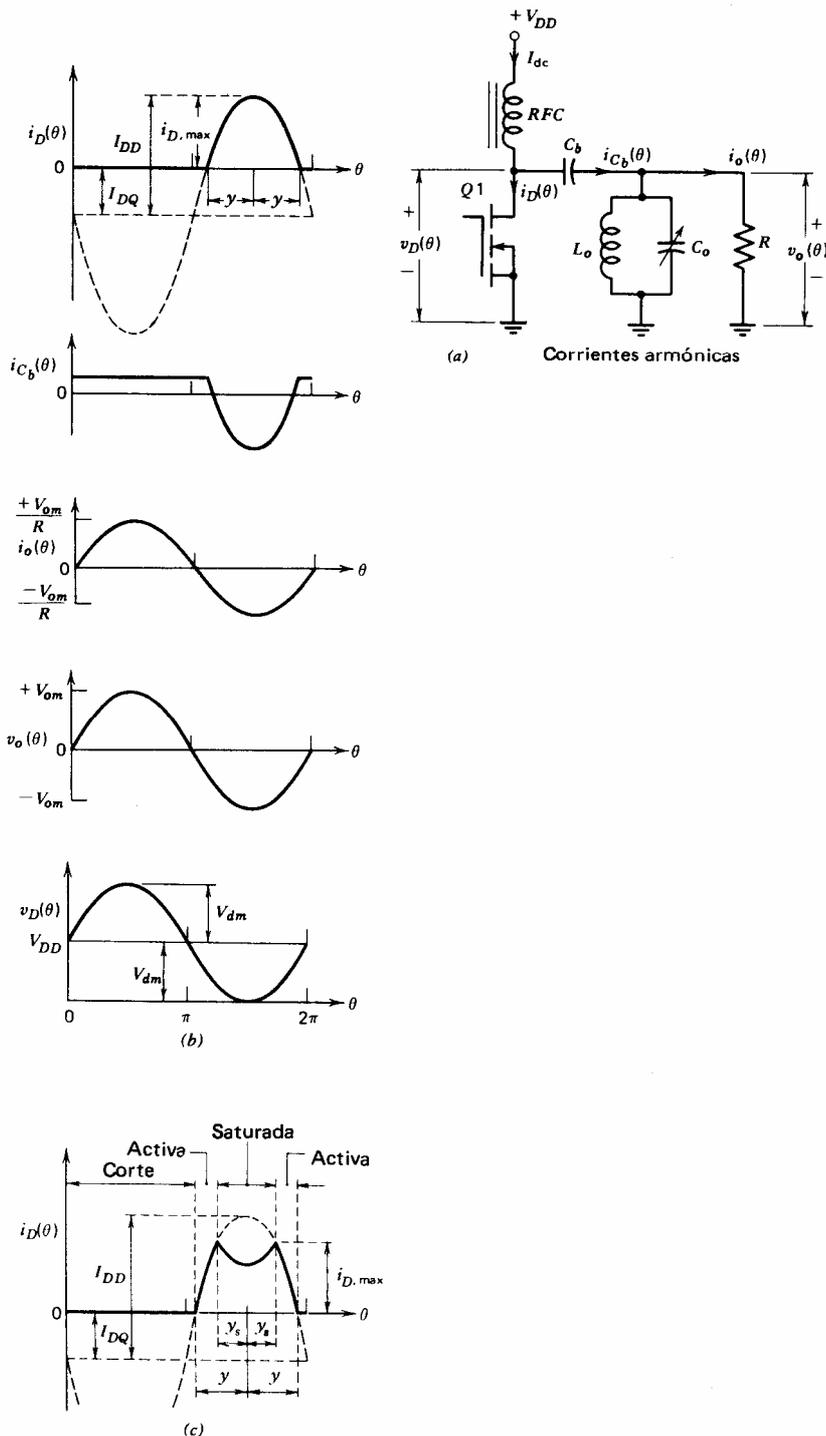


Figura 10.33 Amplificador clase C; a) circuito; b) formas de onda; y c) corriente de drenaje en un amplificador clase C saturado

y la potencia de entrada es entonces $P_i = V_{DD}I_{dc}$. Como la componente de c.c. de la corriente de drenaje fluye por la bobina RFC de RF, la alterna $i_{Cb}(\theta)$ circula a través del capacitor de bloqueo C_b y finalmente a través de la carga o circuito sintonizado. El circuito sintonizado proporciona (idealmente) una trayectoria de impedancia cero hacia tierra para las corrientes armónicas contenidas en $i_{Cb}(\theta)$, evitando así (también idealmente) la generación de voltajes armónicos en la salida. (Observar que esto requiere el uso de un circuito paralelo sintonizado y no uno serie.) El circuito de salida sintonizado paralelo tiene, sin embargo, una reactancia infinita en la componente de frecuencia de $i_{Cb}(\theta)$, obligándola así a penetrar completamente a la carga R, donde genera un voltaje de salida $v_o(\theta) = V_{om} \text{sen } \theta$.

La magnitud V_{om} del voltaje de salida se determina multiplicando la componente de frecuencia fundamental de $i_D(\theta)$ por R ; así,

$$V_{om} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_D(\theta) R \sin \theta d\theta = \frac{R}{2\pi} (4I_{DQ} \text{sen} y + 2I_{DD} y + I_{DD} \text{sen} 2y) \quad (10-5)$$

$$V_{om} = \frac{I_{DD} R}{2\pi} (2y - \text{sen} 2y) \quad (10-6)$$

El segundo paso se realiza usando (10.2) para sustituir a I_{DQ} en (10.5). La potencia de salida es entonces $P_o = V_{om}^2 / 2R$ y la eficiencia es $\eta = P_o / P_i$. Observar que la relación entre la corriente de excitación y la amplitud de salida es por lo general no lineal (figura 10.4.2), pues el ángulo de conducción $2y$ es función de la corriente de excitación. Las excepciones se presentan cuando $y = \pi$ (clase A) y cuando $y = \pi/2$ (clase B). La operación lineal en clase B de terminación única es así posible si se dota de un circuito de salida paralelo sintonizado.

La eficiencia de un amplificador clase C, como la de uno clase A o B, es generalmente la más elevada en su salida pico; es decir, cuando la oscilación del voltaje de drenaje $V_{dm} = V_{om} = V_{DD}$. La clase C se usa, por lo general en aplicaciones donde no hay variación en la amplitud de la señal y donde puedan usarse redes acopladoras. En consecuencia, es posible usualmente diseñar un amplificador en clase C para operar cerca de su salida pico y cerca de su eficiencia máxima.

La eficiencia de una salida pico se puede relacionar directamente con el ángulo de conducción; esto es especialmente útil para diseñar un amplificador con una eficiencia específica. La sustitución de (10.2) en (10.4) da I_{dc} , y de aquí P_i en términos de I_{DD} e y . Fijando $V_{dm} = V_{DD}$ en (10.6), da I_{DD} como función de y . Como la salida de potencia es entonces $P_o = (V_{DD})^2 / 2R$,

$$\eta_{m\acute{a}x} = \frac{2y - \text{sen} 2y}{4(\text{sen} y - y \cos y)} \quad (10-7)$$

La capacidad de salida de potencia se puede relacionar también con el ángulo de conducción. Como $i_{D,m\acute{a}x} = I_{DQ} + I_{DD}$ y $V_{D,m\acute{a}x} = 2V_{DD}$,

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{P_{o,m\acute{a}x}}{v_{D,m\acute{a}x} i_{D,m\acute{a}x}} = \frac{2y - \text{sen} 2y}{8\pi(1 - \cos y)} \quad (10-8)$$

La variación de la eficiencia y de la capacidad de salida de potencia con el ángulo de conducción se muestra en la figura 10.14.2. En primer término, obsérvese las eficiencias del 50 y 78.5 por ciento, familiares para las operaciones en clases A y B, respectivamente. La eficiencia de la operación clase C puede aumentarse hacia el 100 por ciento (en un amplificador ideal) reduciendo el ángulo de conducción hacia cero. El aumento en la eficiencia puede atribuirse a que se saca corriente de drenaje cuando el voltaje de drenador está cerca de su mínimo. Sin embargo, como esto conduce a incrementar el valor pico de la corriente de drenaje para mantener la misma salida, la $P_{m\acute{a}x}$, disminuye hacia cero cuando la eficiencia aumenta hacia el 100 por ciento. Diseñar un amplificador clase C implica, por consiguiente entre otras cosas, un compromiso entre *eficiencia y tasas de diseño*. Note que con un AP de terminación única (un transistor) para operación en clase A o en B, la $P_{m\acute{a}x} = 1/8$; esto es consistente con $P_{m\acute{a}x} = 1/4$ para el amplificador push-pull en clase B dado antes, que tiene dos transistores.

Como se mencionó antes, la forma de onda del voltaje drenador no necesita ser una parte de una onda senoidal. De hecho, difiere por lo general un poco del modelo idealizado que se usa aquí. Se han usado algunos otros modelos incluyendo formas exponencial, cuadrática y rectangular, así como formas derivadas de curvas características de tubo de vacío. Los resultados son generalmente semejantes. Un aspecto interesante de la forma de onda rectangular de drenaje es que la característica de transferencia en amplitud es lineal, independientemente del ángulo de conducción.

Las consideraciones prácticas evitan alcanzar la eficiencia y salida de potencia indicadas por las ecuaciones anteriores idealizadas. Los efectos del voltaje de saturación se pueden determinar usando $V_{eff} = V_{CC} - V_{sat}$ en lugar de V_{CC} en todos los cálculos, salvo por la potencia de entrada, como en un AP clase B. En virtud de la resistencia de saturación R_{on} , un FET entra en saturación (figura 10.14.1) durante parte del ciclo de RF si el voltaje de drenaje mínimo $V_{DD} - V_{dm}$ es igual o menor que $I_{Dm} R_{on} = (I_{DQ} - I_{DD}) R_{on}$. Observe que esto difiere de la forma dada para los APs clase B. Los efectos de la reactancia en la carga de un AP clase C son semejantes a los de un AP clase B y se tratan en la misma manera.

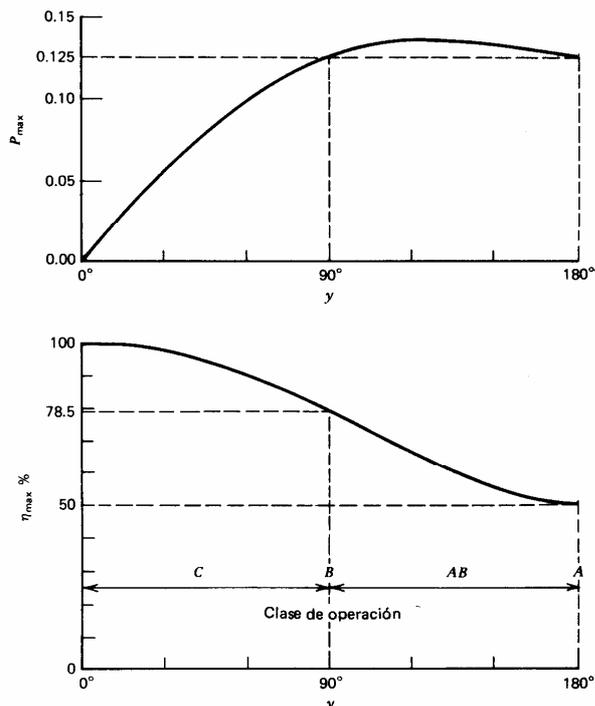


Figura 10.34 Eficiencia y capacidades de potencia de la operación Clase C

Ejemplo 13.1.1. Diseñe un AP clase C para entregar 25 W a una carga de 50 ohms, con eficiencia del 85 % (sin considerar efectos de saturación). La operación se hará en 50 Mhz y la fuente de potencia será de +12 V: en primer lugar, $V_{DD} = 12 \text{ V}$ y $P_o = 25 \text{ W}$ implican una carga de $R = 12^2 / (12 \times 25) = 2.88 \text{ ohms}$, que se debe obtener mediante una red acopladora π con un Q de 5 o mayor. Una solución iterativa de (10.7) auxiliada por la figura 10.34 da $\gamma = 73.5^\circ$ (1282rad) para $\eta_{m\acute{a}x} = 85 \%$. Insertando γ y $V_{om} = 12$ en (10.6) da $I_{DD} = 12.97 \text{ A}$; la (10.2) da entonces $I_{DQ} = 3.70 \text{ A}$. Para estos valores, la corriente de dispositivo máxima $i_{D,m\acute{a}x} = 12.97 - 3.70 = 9.27 \text{ A}$; el voltaje de dispositivo máximo es $2 \times 12 = 24 \text{ V}$. Las corrientes de polarización y de excitación (I_{DQ} e I_{DD}) se obtienen por aplicación de voltajes analógicos a la compuerta.

Multiplicadores de frecuencia

Una forma especial del amplificador clase C es el multiplicador de frecuencia. Cualquier amplificador clase C tiene la capacidad de realizar tal multiplicación si el circuito sintonizado en el colector entra en resonancia a un múltiplo entero de la frecuencia de entrada.

Por ejemplo, un duplicador de frecuencia se puede construir con sólo conectar un circuito sintonizado paralelo que entre en resonancia al doble de la frecuencia de entrada, en el colector de un amplificador clase C. Cuando ocurre el pulso de corriente del colector, el circuito sintonizado se excita, y éste replica al doble de la frecuencia de entrada.

Un circuito triplicador se conforma de la misma manera, excepto que el circuito sintonizado entra en resonancia al triple de la frecuencia de entrada. De este modo, el circuito sintonizado recibe un pulso de entrada por cada tres ciclos de oscilación que produce. Pueden elaborarse multiplicadores para incrementar la frecuencia de entrada en un factor entero de hasta aproximadamente 10. Cuando el factor de multiplicación aumenta, la potencia de salida del multiplicador se reduce. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, los mejores resultados se obtienen con multiplicadores de valor 2 y 3.

Otra forma de visualizar la operación de los multiplicadores de frecuencia clase C es recordar que el pulso de corriente no senoidal es rico en armónicas. Cada vez que ocurre el pulso se generan las armónicas segunda, tercera, cuarta, quinta, y demás. El propósito del circuito sintonizado activo en el colector es actuar como filtro para seleccionar la armónica deseada.

En muchas aplicaciones se requiere un factor de multiplicación mayor que el que puede conseguirse con una sola etapa de multiplicación. En estos casos,

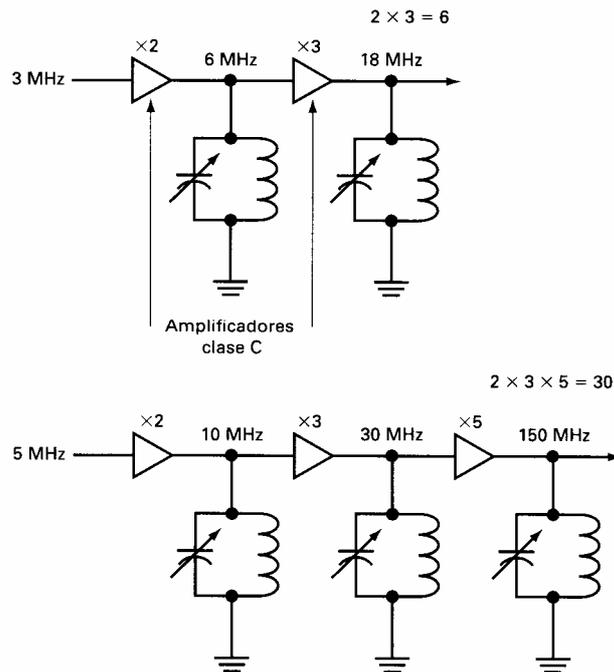


Figura 10-35 Multiplicación de frecuencia con amplificadores clase C.

se conectan dos o más multiplicadores en cascada. La figura 10-35 muestra ejemplos con dos multiplicadores. En el primer caso se conectan en cascada multiplicadores de valor 2 y 3 para producir una multiplicación global de 6. En el segundo ejemplo, tres multiplicadores proporcionan una multiplicación global de 30. El factor de multiplicación total es el producto de los factores de multiplicación de las etapas individuales.

Amplificadores de potencia por conmutación

Un *amplificador por conmutación* es un transistor que se usa como interruptor (switch) que conduce o no. Los transistores bipolares y los MOSFET de tipo enriquecimiento se usan con frecuencia en aplicaciones de amplificadores por conmutación. Un transistor bipolar como interruptor está en corte o saturado. En el primer caso, no hay disipación de potencia; en el segundo, el flujo de corriente es máximo, pero el voltaje emisor-colector es en extremo bajo, en general de menos de 1 V. Por lo tanto, la disipación de potencia es demasiado baja.

Cuando se usan MOSFET de enriquecimiento, el transistor está apagado o encendido. En el primer estado no fluye corriente y, por lo tanto, no hay disipación de potencia. Cuando el transistor conduce, su resistencia entre fuente y drenaje suele ser muy baja: no más de varios ohms y en general de mucho menos de 1 ohm. De esta manera, la disipación de potencia es en extremo baja, incluso con corrientes altas. El uso de amplificadores de potencia por conmutación permite obtener eficiencias de más de 90%. Las variaciones de corriente en un amplificador de potencia por conmutación son ondas cuadradas y, por consiguiente, generan armónicas. Sin embargo, éstas son más o menos fáciles de eliminar por filtrado mediante circuitos sintonizados y filtros entre el amplificador de potencia y la antena.

Los amplificadores por conmutación de uso más común en aplicaciones de RF son los de clase D y E. Un amplificador clase D usa un par de transistores para producir un pulso de onda cuadrada en un circuito sintonizado.

La figura 10-36 muestra un amplificador clase D implementado con transistores MOSFET del modo enriquecimiento. La portadora se aplica a las rejillas de los MOSFET con un desfase de 180°, utilizando un transformador dotado de secundario con derivación central. Cuando la entrada a la rejilla de Q1 es positiva, la entrada a la rejilla de Q2 es negativa. Por lo tanto, Q1 conduce y Q2 no actúa. En el siguiente semiciclo de la entrada, la rejilla de Q2 se hace positiva y la de Q1 se vuelve negativa. Entonces Q2 conduce, aplicando un pulso negativo al circuito sintonizado. Recuerde que los MOSFET de enriquecimiento en general no conducen hasta que el voltaje de su rejilla alcanza un valor de umbral específico. La resistencia

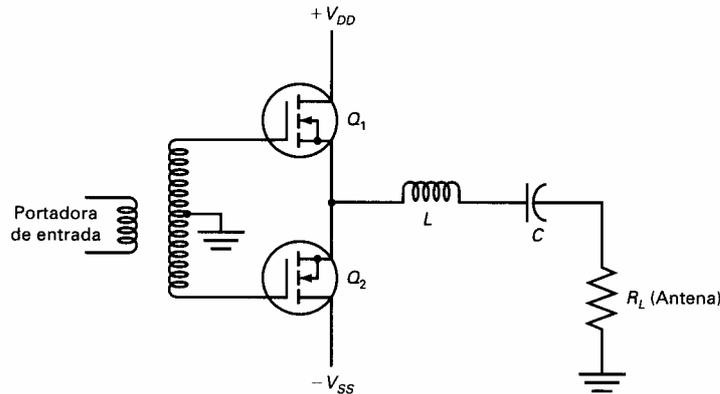


Figura 10-36 Amplificador clase D con elementos MOSFET de tipo enriquecimiento.

en el estado de conducción es muy baja. Los transistores suministran una onda cuadrada bipolar al circuito resonante serie, el cual elimina las armónicas impares y produce una onda senoidal en la carga. En la práctica, pueden conseguirse eficiencias de hasta 90% con un circuito como el de la figura 10-36.

En los amplificadores clase E se usa un solo transistor. Pueden emplearse transistores bipolares y MOSFET, aun cuando se prefieren estos últimos debido a sus bajos requerimientos para excitarlo. Además, como la conmutación de los MOSFET es más rápida (no hay almacenamiento de portadora como en los BJT), resultan más eficientes. La figura 10-37 ilustra un amplificador de RF clase E típico. La portadora, que al principio es una onda senoidal, se aplica a un circuito formador que, de manera eficaz, la convierte en onda cuadrada. La portadora suele ser de FM. La señal de la portadora de onda cuadrada se aplica después a la base del amplificador de potencia bipolar clase E. Q1 se conmuta entre encendido y apagado en la frecuencia de la portadora. La señal del colector se aplica a un filtro pasabajos y a un circuito sintonizado de acoplamiento de impedancia formado por C1, C2 y L1. Las armónicas se eliminan, dejando la onda senoidal fundamental que se aplica a la antena. Con esta configuración se consigue un alto nivel de eficiencia.

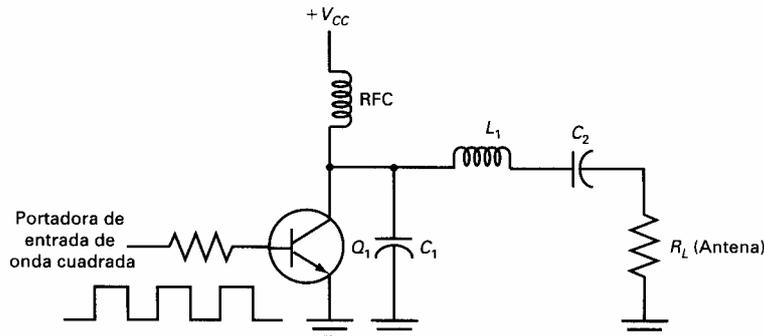


Figura 10-37 Amplificador de RF clase E.

Apéndice

- Como el ancho de banda de una señal de RF común es una fracción pequeña de la frecuencia de portadora (y del ancho de banda del AP), las señales no deseadas a la salida del amplificador de poder, se pueden dividir en tres categorías. La figura 12.1 describe las relaciones de estas señales con la señal deseada, que en este caso consiste de dos tonos de amplitudes iguales de frecuencias $f_c \pm f_m$. La no linealidad del amplificador produce dos tipos de señales no “deseadas”: llamadas *armónicas* y los *productos de distorsión por intermodulación* (IMD). Los productos IMD (identificados como órdenes tercero, quinto, séptimo y noveno en la figura 12.1) son prominentes cerca de la frecuencia de portadora. Causan distorsión en la señal recibida e interferencia de canal adyacentes o ambas. Otras señales no deseadas incluyen oscilaciones subarmónicas y parásitas y productos de mezclador; se les llama productos espurios o simplemente "spurs". En un amplificador de potencia de RF, las armónicas y alguno de los productos espurios se pueden eliminar con filtros; sin embargo, los IMD generados deben ser de un nivel aceptablemente bajo.

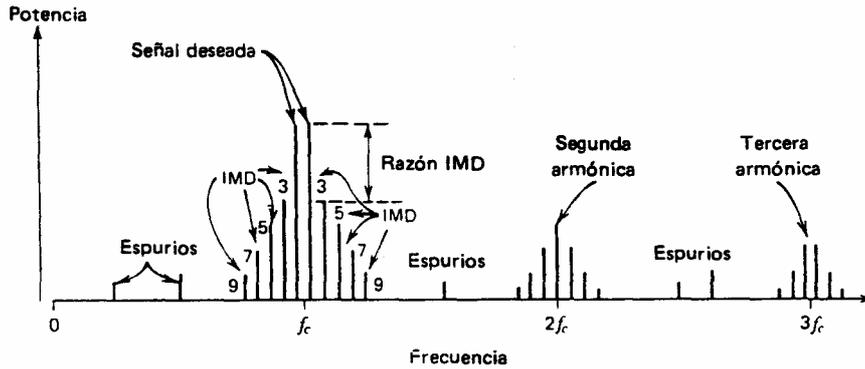


Figura 10.38 Productos de distorsión en un AP de RF

- Los transistores de unión bipolares (BJT) se usaron en la mayoría de las aplicaciones de potencia de RF antes de la confección de este texto. Los dispositivos MOSFET verticales (VMOS) desarrollados recientemente se fueron incorporando en muchos nuevos diseños, en virtud de su facilidad de polarización e inmunidad a la ruptura secundaria. En consecuencia, se usan los dispositivos BJT y VMOS, dando atención a sus características relevantes y a las diferencias asociadas en diseño. (Se aplican, por lo general, los mismos principios de diseño al equipo de tubos de vacío de alta potencia).
- Para asegurar la confiabilidad del AP, el estudiante debe prestar atención cuidadosa a especificaciones de transistor tales como voltajes y corrientes máximos de base (compuerta) y colector (drenaje); temperatura de unión máxima y condiciones de operación que conduzcan a ruptura secundaria en los BJTs. El significado de las especificaciones de corriente y pico de voltaje es evidente, aunque el estudiante debe observar con todo cuidado de qué manera la especificación dada se relaciona con otras condiciones de circuito, como polarización de base. La ruptura secundaria se origina por el valor excesivo del producto instantáneo de voltaje y corriente del colector dando lugar a una mancha caliente dentro del transistor.
- Las especificaciones del dispositivo se deben interpretar cuidadosamente, pues los datos proporcionados en los manuales se relacionan a menudo con el pretendido uso del dispositivo, más que con sus especificaciones máximas. Por ejemplo, un transistor de potencia de RF lineal "28.V", se destina para usarse en un AP en la clase B con una alimentación de 28 V en c.c. y, por lo tanto, tendrá una especificación de voltaje máxima de 56 V al menos. En forma similar, la corriente de alimentación máxima en c.c. se da algunas veces como especificación más que como corriente de colector instantánea máxima.
- Dos parámetros que son muy útiles para comparar diferentes configuraciones y clases de operación de los AP, son la eficiencia y la capacidad de salida de potencia. La *eficiencia de potencia en el colector* (η) o simplemente eficiencia, se define como la razón entre la potencia de salida RF y la potencia de entrada de c.c. del circuito de colector. La *capacidad de salida de potencia normalizada* ($P_{m\acute{a}x}$) se define como la máxima potencia de salida de RF que se puede obtener sin exceder la corriente y voltajes de pico del colector de 1 A y 1 V, respectivamente. La capacidad de potencia de salida real se obtiene de $P_{m\acute{a}x}$, al multiplicarla por las especificaciones de voltaje y corriente de colector.
- Será conveniente para este capítulo expresar los voltajes y corrientes instantáneas en términos de tiempo angular:

$$\theta = \omega t = 2\pi f t$$
- pues la mayoría de los procesos en los amplificadores son periódicos y pueden, por lo tanto, describirse completamente en términos del comportamiento dentro de un solo ciclo de RF ($0 \leq \theta < 2\pi$).
- Se han simplificado las características de transistor y en gran medida se han ignorado los efectos de alta frecuencia para disponer de ecuaciones y modelos analíticos manejables, para los AP. A pesar de ello, el estudiante encontrará los resultados predichos generalmente exactos dentro de un porcentaje bajo y bastante adecuados para fines de diseño. El comportamiento del transistor se divide en tres regiones, designadas como de corte, activa y de saturación. Obsérvese que el término saturación se usa aquí con FETs en modo análogo a como se usó con los BJT; muchos textos sobre teoría de semiconductores usan el término saturación para referirse a una corriente de limitación.
- Un BJT NPN se sitúa en la región de corte aplicándole un v_{BE} menor que su voltaje de iniciación V_{γ} ($\approx 0.7V$ para dispositivos a silicio); en esta región el BJT es esencialmente un circuito abierto. Al incrementar el v_{BE} hasta hacerlo escasamente mayor que V_{γ} , el transistor entra a la región activa. La unión base-emisor se convierte en un diodo polarizado directamente y la unión colector-emisor se convierte en una fuente de corriente, la que es linealmente proporcional a la corriente de base. Para operar en la región activa, el v_{CE} debe ser mayor que el voltaje de saturación V_{sat} ($= V_{CE, sat} = 0.3 V$ para BJT único, con corriente de colector baja). Si la carga no permitiera que $v_{CE} > V_{sat}$ el dispositivo entraría a la región de saturación y el voltaje de unión colector-emisor sería casi equivalente a un V_{sat} constante.

- Un FET se coloca similarmente en la región de corte aplicándole un v_{gs} menor que el voltaje de umbral v_T (≈ 2 a 3 V para FETs de potencia VMOS) y queda esencialmente como circuito abierto bajo estas condiciones. Al hacerse el V_{GS} mayor que el V_T , el FET entra a la región activa y la conexión drenador-fuente es casi equivalente a una fuente de corriente. El valor de la corriente de drenaje en un FET VMOS es casi linealmente proporcional a $v_{GS} - V_T$, aunque en FETs operando con señal débil, lo es a $(v_{GS} - V_T)$. Un FET es aproximadamente equivalente a una resistencia R_{on} cuando opera en la región de saturación; se coloca en esta región si la carga produce un voltaje de drenaje menor que $i_D R_{on}$ si el FET estuviera en la región activa. Las características de los tubos de vacío son en cierta manera semejantes a las de los FETs; no obstante, el V_T es negativo y el voltaje positivo reja-cátodo hará que fluya una corriente de reja considerable.
- La eficiencia es siempre la razón entre la potencia de RF de salida y la potencia de c.c. del colector.

RESUMEN

1. Un transmisor de radio genera la señal de la portadora, proporciona amplificación de potencia y aplica modulación.
2. El transmisor más simple es un oscilador que se enciende y apaga con una llave para producir señales en clave Morse de CW.
3. La mayoría de los transmisores constan de un oscilador a cristal para generar una frecuencia de la portadora precisa y estable, un amplificador buffer que aísla el oscilador de la portadora de su carga, uno o más amplificadores de excitación para incrementar el nivel de potencia de RF y un amplificador de potencia final que aplica la señal a la antena.
4. En los transmisores de AM se usan amplificadores clase C para incrementar el nivel de potencia de RF; se modula la etapa final.
5. Los transmisores de modulación de frecuencia usan amplificadores clase C para incrementar el nivel de potencia de RF.
6. En un amplificador clase A la corriente del colector fluye de manera continua. La salida es directamente proporcional a la entrada; por lo tanto, se trata de un amplificador lineal.
7. Los amplificadores clase B se polarizan en el corte para que la corriente de colector fluya en 180° del ciclo de entrada.
8. Los amplificadores clase B por lo general se conectan en un circuito en push-pull (en contrafase), donde un transistor amplifica cada mitad de la señal de entrada.
9. Los amplificadores clase C se polarizan después del corte; la corriente fluye entre 90° a 150° del ciclo de entrada.
10. Los pulsos de corriente del colector en un amplificador clase C se convierten en una onda senoidal continua mediante un circuito resonante.
11. Los pulsos de corriente del colector en un amplificador clase C contienen muchas armónicas, las cuales se eliminan con un circuito sintonizado de salida.
12. Un amplificador clase C puede usarse como multiplicador de frecuencia conectando a la salida un circuito resonante sintonizado a un múltiplo entero de la frecuencia de entrada.
13. Los amplificadores de RF pueden oscilar debido a la realimentación desde la capacitancia interna del transistor. Esto puede eliminarse, o impedirse, por neutralización, proceso que cancela la realimentación con una realimentación desfasada.
14. Los multiplicadores de frecuencia pueden conectarse en cascada para producir frecuencias de salida más altas.
15. En un transmisor de FM los multiplicadores de frecuencia incrementan la desviación y la frecuencia de la portadora.
16. Para incrementar el nivel de potencia de las señales de AM o BLU de bajo nivel se usan amplificadores lineales que operan en clase A o B.
17. Los amplificadores de potencia clase D y clase E usan transistores como interruptores para producir una salida de onda cuadrada a la frecuencia de la portadora. Para eliminar las armónicas y acoplar las impedancias se emplean circuitos sintonizados. Los amplificadores de potencia por conmutación son los más eficientes porque pueden alcanzar eficiencias de 90% a 98%.
18. Se puede conseguir una potencia más alta con amplificadores de estado sólido sumando las salidas de dos o más amplificadores en un transformador combinador de potencia.
19. Las redes de acoplamiento de impedancias se emplean para interconectar amplificadores de RF y acoplar la potencia a la antena a fin de asegurar la transferencia de óptima potencia.
20. La transferencia de potencia máxima ocurre cuando la impedancia de carga es *igual* a la impedancia del generador o fuente.
21. Los transformadores de radiofrecuencia por lo común se construyen con núcleos de hierro pulverizado en forma de dona llamados toroides.
22. La capacidad de acoplamiento de impedancias de un transformador está determinada por su relación de vueltas o

espiras: $(N_p/N_s)^2 = Z_p/Z_s$.

23. Los inductores fabricados con toroides para una inductancia dada son más pequeños, usan menos vueltas de alambre, tienen una Q más alta y no requieren rejillas.
24. Un balun es un transformador conectado de manera especial para transformar circuitos de balanceados a no balanceados, o viceversa, y proporcionar acoplamiento de impedancia.
25. Los transformadores toroidales y los baluns son dispositivos de banda ancha que operan en un ancho de banda extenso.
26. Los amplificadores de potencia de RF no sintonizados, lineales y de banda ancha, proporcionan amplificación en un amplio intervalo de frecuencias.
27. Los circuitos de procesamiento de voz de un transmisor impiden la sobremodulación, evitan el ancho de banda excesivo de las señales e incrementan la potencia transmitida media en sistemas de AM y BLU.
28. Un recortador de voz usa diodos para limitar la amplitud de la señal modulante de audio. Un filtro pasabajos suaviza cualquier distorsión por recorte e impide bandas laterales excesivas.
29. Los compresores de voz usan circuitos de control automático de ganancia (AGC) para limitar la amplitud de audio; la ganancia del circuito es inversamente proporcional a la amplitud de la señal de audio.
30. En circuitos AGC, un rectificador y un filtro convierten el audio o la radiofrecuencia en un voltaje de cc que controla la ganancia de un amplificador de RF o audio para impedir la sobremodulación.
31. La ganancia de un amplificador de transistor se puede variar cambiando la corriente del colector.
32. Es común que el procesamiento de voz se lleve a cabo en forma digital convirtiendo la señal de audio a la forma digital, manipulándola en un procesador digital de señales y convirtiéndola de nuevo en analógica.

Preguntas para el repaso del capítulo

Elija la letra que dé la mejor respuesta a cada pregunta.

- 6-1. ¿Cuál de los siguientes circuitos *no* es un componente típico de todo transmisor de radio?
 - a) Oscilador de portadora.
 - b) Amplificador de excitación.
 - c) Mezclador.
 - d) Amplificador de potencia final.
- 6-2. ¿En qué tipo de transmisor *no* se usan amplificadores clase C?
 - a) AM.
 - b) BLU.
 - c) CW.
 - d) FM.
- 6-3. Al circuito que aísla el oscilador de portadora respecto de los cambios en la carga se le llama
 - a) Amplificador final.
 - b) Amplificador de excitación.
 - c) Amplificador lineal.
 - d) Amplificador de aislamiento.
- 6-4. ¿En cuántos grados de una onda senoidal de entrada conduce un amplificador clase B?
 - a) 90° a 150°.
 - b) 180°.
 - c) 180° a 360°.
 - d) 360°.
- 6-5. La polarización de un amplificador clase C que produce una red RC de entrada se conoce como
 - a) Polarización de señal.
 - b) Autopolarización.
 - c) Polarización externa fija.
 - d) Polarización de umbral.
- 6-6. Un transmisor de FM tiene un oscilador de portadora a cristal de 9 MHz y multiplicadores de frecuencia con factores 2, 3 y 4. La frecuencia de salida es
 - a) 54 MHz.
 - b) 108 MHz.
 - c) 216 MHz.
 - d) 288 MHz.
- 6-7. ¿Cuál es la clase de amplificador de potencia de RF más eficiente?
 - a) A.
 - b) E.
 - c) B.

- d) C.
- 6-8. La corriente de colector en un amplificador clase C es un(a)
- Onda senoidal.
 - media onda senoidal.
 - Pulso.
 - Onda cuadrada.
- 6-9. ¿En qué intervalo está la potencia máxima de los amplificadores de potencia de RF de transistores típicos?
- Miliwatts.
 - Watts.
 - Cientos de watts.
 - Kilowatts.
- 6-10. La auto-oscilación en un amplificador de transistor en general la causa
- El exceso de ganancia.
 - La inductancia parásita.
 - La capacitancia interna.
 - Impedancias no acopladas.
- 6-11. Neutralización es el proceso de:
- Cancelar el efecto de capacitancia interna del dispositivo.
 - Desviar la corriente alterna no deseada.
 - Reducir la ganancia.
 - Eliminar las armónicas.
- 6-12. ¿Con qué tipo de amplificador deben ampliarse las señales de AM de bajo nivel?
- En push-pull.
 - Clase C.
 - De conmutación.
 - Lineal.
- 6-13. ¿En qué clase de amplificador el transistor se usa como interruptor?
- Clase D.
 - Clase C.
 - Clase B.
 - Clase A.
- 6-14. ¿A qué componente se parece más un combinador de potencia?
- Transistor.
 - Transformador.
 - Capacitor.
 - Inductor.

Problemas

- ¿Qué es la agilidad de frecuencia? ¿En qué circunstancias se desea?
- ¿Qué señales espurias generan comúnmente los transmisores?
- ¿Por qué es necesario suprimir la emisión de armónicas y otras señales espurias en un transmisor?
- ¿Qué significa eficiencia global de un transmisor?
- ¿Por qué se usa la compresión en muchos transmisores de AM?
- ¿Cuál es la manera más común de estimar la salida de potencia de un transmisor de AM?
- ¿Qué quiere decir ciclo de trabajo de un transmisor?
- ¿Es posible usar amplificadores de Clase C para amplificar una señal AM? Explique su respuesta.
- ¿Qué ventajas tiene el uso de un sintetizador de frecuencias para la etapa del oscilador de un transmisor sobre:
 - un oscilador controlado por cristal?
 - un VFO?
- ¿Qué ventajas tiene la modulación de amplitud de alto nivel con respecto a la modulación de bajo nivel? ¿La modulación de bajo nivel tiene alguna ventaja?
- ¿Es posible aplicar una señal modulante en la rejilla de control de un tubo al vacío o en la base de un transistor que se usen como la etapa del amplificador de potencia (salida) de un transmisor? ¿Se considera que este procedimiento es una modulación de alto nivel o de bajo nivel? Explique su respuesta.
- Explique la función de cada uno de las siguientes etapas en un transmisor: regulador separador, multiplicador y excitador (driver)?
- ¿Por qué es indeseable conectar una gran cantidad de transistores en paralelo en un amplificador de potencia para RF con la finalidad de lograr una capacidad de disipación de potencia mayor?
- ¿Qué quiere decir un amplificador de audio "por conmutación"?
- Explique cómo una modulación por duración de pulsos se usa para mejorar la eficiencia de un transmisor de AM?

16. ¿Qué se quiere dar a entender con modulación digital de amplitud? ¿Tiene algunas ventajas con respecto a otros métodos?
17. ¿Qué es una carga ficticia? ¿Es útil?
18. Describa un método para generar señales de DSB-SC.
19. Describa un método para generar señales de SSB-SC.
20. ¿Por qué los amplificadores de Clase C son inadecuados para usarlos en los amplificadores de potencia de un transmisor de SSB?
21. ¿Por qué un transmisor de FM puede usar modulación de bajo nivel seguida por amplificación de Clase C y esto es imposible con AM?
22. ¿Qué limita la cantidad de desviación de frecuencia que puede obtenerse con un modulador con varactor para FM directa?
23. ¿Cómo se aumenta la desviación de una señal de FM?
24. ¿Qué significa FM indirecta?
25. ¿Qué método de FM directa permite que FM de banda ancha se genere directamente en la frecuencia de portadora? Trace un diagrama de bloques para este tipo de modulador.
26. Explique la operación de un modulador de FM que tiene un oscilador controlado numéricamente.
27. El oscilador de un transmisor de CB tiene una precisión garantizada de $\pm 0.005\%$. ¿Cuáles son las frecuencias máxima y mínima en las cuales podría transmitir en realidad, si está ajustado para que transmita en el canal 20 con una frecuencia portadora nominal de 27.205 MHz?
28. Un transmisor de CB tiene que suministrar 4 W de potencia de portadora a una carga de 50 Ω mientras opera con una fuente de alimentación que le proporciona 13.8 V. La corriente nominal de la fuente de alimentación es de 1 A sin modulación y de 1.8 A con modulación de 80%. Calcule la eficiencia global de este transmisor con modulación y sin ella.
29. La respuesta de audiofrecuencia de un transmisor de AM, medida desde la entrada del micrófono hacia el secundario del transformador de modulación, es de 3 dB abajo a 3 kHz desde su nivel a 1 kHz. Si una señal de 1 kHz modula el transmisor a 90%, ¿cuál es el porcentaje de modulación debido a una señal de 3 kHz con el mismo nivel en la entrada?
30. Trace un diagrama de bloques para un transmisor de AM que utiliza modulación de alto nivel, y cuenta con un oscilador, regulador separador, excitador o preamplificador y amplificador de potencia. Señale la clase probable de operación de cada etapa de amplificación.
31. Trace un diagrama de bloques para un transmisor de AM que cuenta con un oscilador, regulador separador, pre-excitador (pre-driver), excitador (driver) y amplificador de potencia. La modulación se aplica en la etapa del pre-excitador. Señale la clase probable de operación de cada etapa de amplificación.
32. La etapa del amplificador de potencia para RF de un transmisor tiene una salida de 50 kW y una ganancia de 15 dB. ¿Cuánta potencia debe suministrar a esta etapa la etapa anterior?
33. El amplificador de potencia de un transmisor de AM tiene una potencia de portadora de salida de 25 W y una eficiencia de 70%; además, la modulación se hace en el colector. ¿Cuánta potencia de audio tendrá que alimentarse a esta etapa para tener una modulación de 100%?
34. Si el transmisor de la pregunta anterior funciona con una fuente de alimentación de 24 V, ¿cuál será la impedancia vista hacia el amplificador de potencia desde el secundario del transformador de modulación?
35. Se diseña un amplificador de potencia para RF con transistor que opere en la Clase C para que produzca una salida de 30 W con un voltaje de alimentación de 50 V.
 - (a) Si la eficiencia de la etapa es de 70%, ¿cuál es la corriente promedio del colector?
 - (b) Si se supone una modulación de alto nivel, ¿cuál es la impedancia vista por el secundario del transformador de modulación?
 - (c) ¿Qué salida de potencia se requeriría desde las etapas de audio para conseguir una modulación de 100% del amplificador?
 - (d) ¿Cuál es el voltaje máximo que aparece entre el colector y el emisor del transistor?
36. Calcule una impedancia de carga conveniente para el amplificador del problema 35. Bosqueje una red de adaptación adecuada para que el amplificador excite una carga de 50 Ω (no se requieren los valores de los componentes).

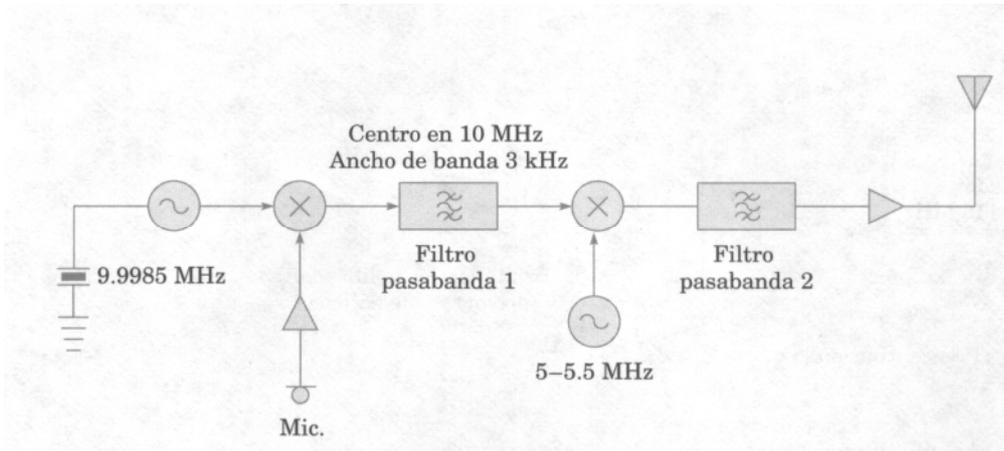


Figura 10.39

En un transmisor hay 12 módulos en su etapa de salida de estado sólido. Calcule la reducción de potencia (en decibeles) que habría si un módulo fallara.

37. ¿Cuál sería la frecuencia de muestreo mínima permisible para un modulador por duración de pulsos, si se requiriera manejar un intervalo de frecuencias de banda base de 50 Hz a 10 kHz.
38. Un transmisor de SSB tiene una PEP de 250 W. Lo modulan por igual dos audiofrecuencias a 400 Hz y 900 Hz. La frecuencia portadora es de 14.205 MHz y el transmisor genera la LSB. Dibuje la salida en los dominios del tiempo y de la frecuencia para una impedancia de carga de 50 ohm
39. Una portadora de 10 MHz y una señal modulante sinusoidal de 2 kHz se aplican a un modulador balanceado. Trace la salida en los dominios del tiempo y de la frecuencia, y señale las escalas del tiempo y la frecuencia, respectivamente.
41. Un generador de SSB tipo filtro utiliza una filtro ideal pasa-banda con una frecuencia central de 5.000 MHz y un ancho de banda de 2.7 kHz. ¿Qué frecuencia debe usarse para el oscilador de portadora, si el generador tiene que producir una señal USB con una respuesta en frecuencia de banda base que tenga un límite inferior de 280 Hz?
42. El diagrama de bloques de la figura 10.39 es de un transmisor de SSB.
 - (a) Si se usa un oscilador de frecuencia variable (VFO) que sintoniza desde 5.0 hasta 5.5 MHz, el transmisor operará en dos intervalos de frecuencia que pueden seleccionarse mediante una elección adecuada del filtro pasabanda 2, FFB2. ¿Qué intervalos son?
 - (b) ¿Qué banda lateral se produciría en la salida para cada uno de los intervalos de frecuencia especificados en el inciso (a)?
 - (c) La otra banda lateral podría generarse cambiando la frecuencia del oscilador de portadora. Seleccione un valor conveniente para esta frecuencia.
43. El diagrama de bloques de un transmisor de SSB se muestra en la figura 10.40. La frecuencia del oscilador local es superior que la frecuencia en la cual la señal de SSB es generada, y la diferencia entre las dos frecuencias se usa en la salida.
 - (a) Seleccione una frecuencia conveniente para el oscilador de portadora, si el transmisor tiene que producir una señal SSB.
 - (b)
 - (c) ¿Cuál debe ser la frecuencia del oscilador local, si la frecuencia portadora (suprimida) en la antena deberá ser exactamente de 30 MHz?
 - (c) Suponga que el transmisor es modulado por un solo tono sinusoidal de 1 kHz. Está operando con una PEP de 100 W en una carga de 50 S2. Dibuje la salida en los dominios del tiempo y de la frecuencia, y señale todas las escalas apropiadas.
44. Considere una señal de AM de portadora completa con $m = 1$. Demuestre matemáticamente que la PEP de esta señal es igual a cuatro veces la potencia de la portadora.

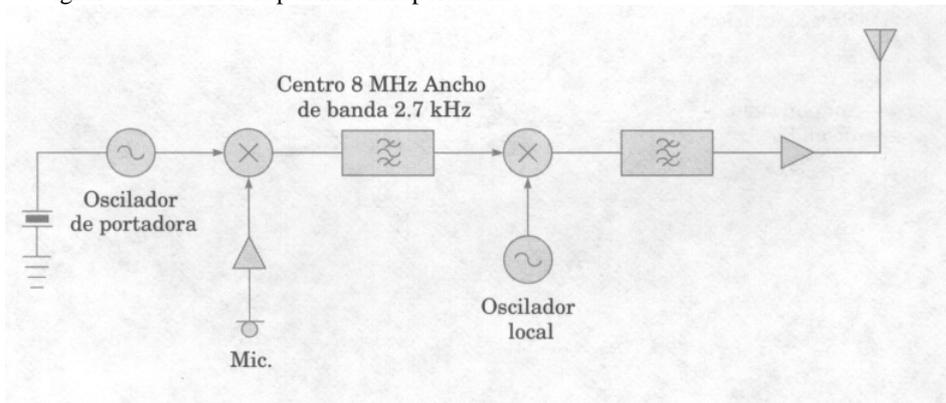


Figura 10.40

Transmisores FM

45. Un transmisor de FM directa tiene el diagrama de bloques que se ilustra en la figura 10.41.
 - (a) ¿Cuál es la frecuencia de portadora de la señal de salida?
 - (b) Si el modulador tiene una sensibilidad de 5 kHz/V, ¿qué voltaje de modulación se requeriría para una desviación de 50 kHz en la salida?
46. Determine la frecuencia de portadora y la desviación en la salida del transmisor de FM directa que se ilustra en la figura 10.42.
47. Suponga que necesita transmitirse en una frecuencia portadora de 600 MHz usando la misma señal en banda base, modulador y desviación del problema 46. Dibuje un diagrama de bloques en donde se muestre cómo podría modificarse la configuración original del transmisor.
48. (a) En un transmisor de FM indirecta, ¿qué desplazamiento de fase, en grados, corresponde a un índice de modulación de frecuencia de 4.5?
 - (c) Suponga que un modulador de fase tiene un desplazamiento de fase máximo de 45°. ¿Cómo puede aumentarse este desplazamiento de fase a la cantidad que se calculó

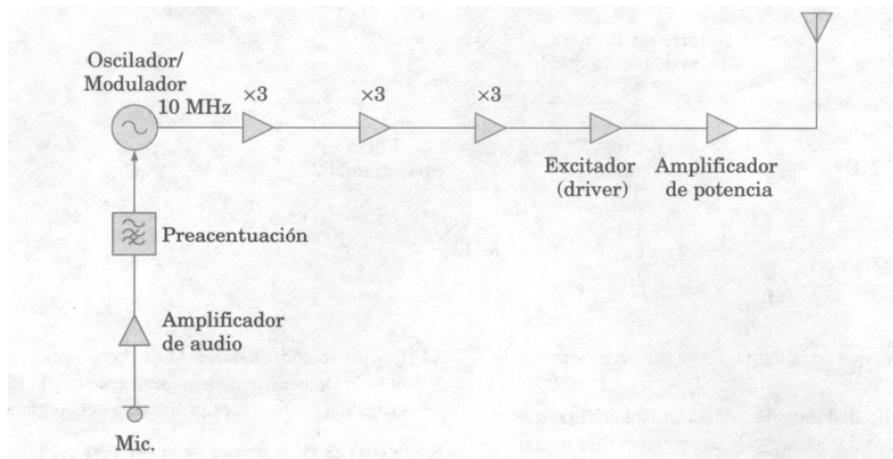


Figura 10.41

49. El diagrama de bloques de la figura 10.43 es de un transmisor de FM indirecta. La potencia de salida total es 1 W a 501Z.
 - (a) Identifique el bloque que ha sido dejado vacío.
 - (b) ¿Qué desviación de fase se necesita en el modulador con objeto de que la frecuencia de salida se desvíe 5 kHz con una señal modulante de 1 kHz?
 - (c) Utilice las funciones de Bessel para trazar el espectro de la señal de salida. Asegúrese de incluir las escalas convenientes. Es necesario incluir sólo la portadora y las primeras tres bandas laterales de cada lado.
50. En la figura 10.44 se ilustra un diagrama de bloques de un transmisor FM que utiliza FM indirecta.
 - (a) ¿Cuál es la frecuencia del oscilador de portadora?
 - (b) ¿Qué desviación de fase máxima debe ser capaz de suministrar el modulador de fase si el transmisor debe producir FM con una desviación máxima de 25 kHz con una frecuencia de la señal modulante de 10 kHz?
 - (c) ¿Por qué es necesario el integrador?

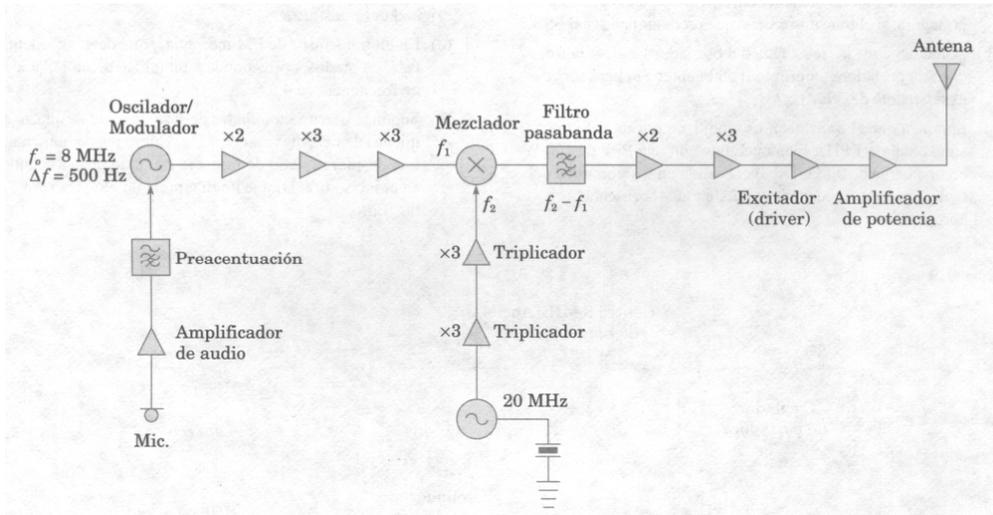


Figura 10.42

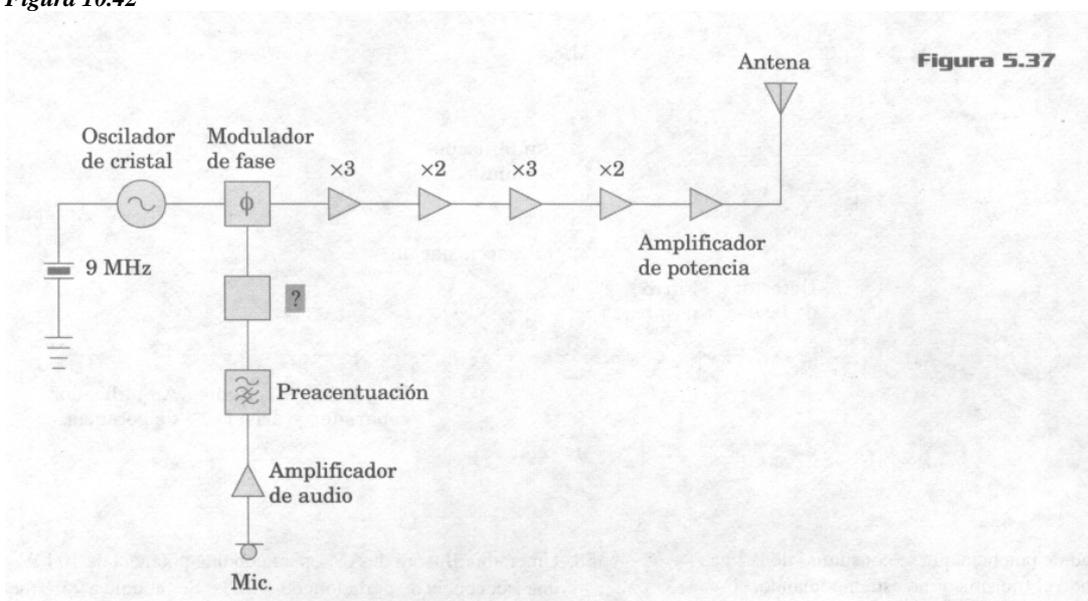


Figura 5.37

Figura 10.43

51. En la figura 10.45 se muestra el diagrama de bloques de una transmisor de FM con un PLL.

- (a) Calcule el valor requerido de N para una frecuencia de portadora de 91.1 MHz.
- (b) Determine el valor mínimo aceptable de k_f para el vco si el transmisor tiene que producir una desviación de 75 kHz con una señal de entrada de 2 V RMS.

52. En un vatímetro conectado en serie en la línea de transmisión entre un transmisor y su antena se lee 50 W en la dirección hacia delante y 30W en la dirección contraria. ¿Cuánta potencia de salida se está produciendo en realidad?

Sistemas

53. Un transmisor AM opera con una carga resistiva de 50Ω . El voltaje RMS medido en la salida es 250 V sin modulación y 300 V con modulación usando un medidor de lectura de RMS verdadera. Determinar

- (a) La potencia con modulación.
- (b) La potencia sin modulación.
- (c) El índice de modulación.
- (d) El voltaje de pico con modulación.
- (e) La eficiencia global con modulación si el transmisor consume 3 kW de la línea de ac cuando está modulado.

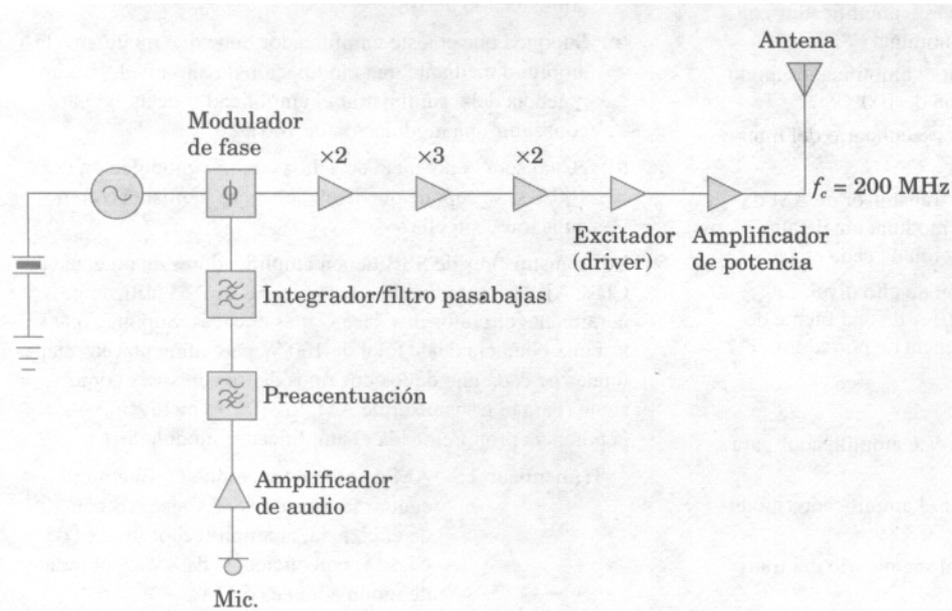


Figura 10.44

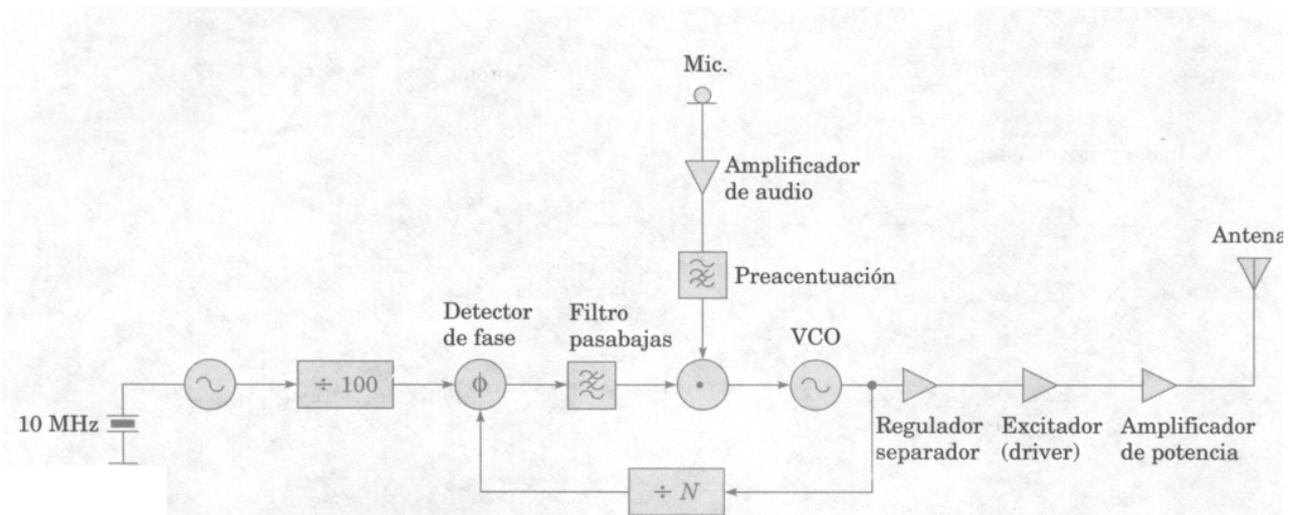


Figura 10.45

- (f) La cantidad de potencia que se consumirá de la línea de ac cuando el transmisor no está modulando, si la eficiencia es la misma que la del inciso (e)
54. Utilice un programa para computadora similar a APPCAD para resolver los siguientes problemas. En cada caso, intente varias configuraciones y seleccione una con valores razonables.
 - (a) Adopte o acople una fuente de 10 ohm con una carga de 50 ohm a 1 MHz.
 - (b) Adopte o acople una fuente de 1000 ohm con una carga de 50 ohm a 10 MHz.
 55. Un transmisor de AM usa modulación de alto nivel. El amplificador de potencia de RF funciona con una fuente de 12 V, y genera una potencia de portadora de 75 W con una eficiencia de 75%.
 - (a) ¿Cuál es la corriente de de que se extrae con esta etapa de la fuente de alimentación?
 - (b) ¿Qué impedancia de carga requiere este amplificador con la finalidad de entregar la potencia nominal?
 - (c) ¿Cuánta potencia debe proporcionar el amplificador modulador para conseguir una modulación de 100%?
 - (d) ¿Qué impedancia se observaría en el secundario del transformador de modulación?
 56. Dibuje un diagrama de bloques para un transmisor de AM de potencia moderada (100 W) que utiliza modulación de alto nivel. Señale la clase probable de operación de cada etapa.
 57. Un transmisor de AM utiliza modulación de alto nivel. El amplificador de potencia de RF extrae 10 A de una fuente de alimentación de 20 V, y genera una potencia de portadora de 125 W.
 - (a) ¿Cuál es la eficiencia de esta etapa?
 - (b) ¿Qué impedancia de carga requiere este amplificador para que entregue potencia nominal?
 - (c) ¿Cuánta potencia debe proporcionar el amplificador modulador para tener una modulación de 90%?

- (d) ¿Qué impedancia se observaría en el secundario del transformador de modulación?
58. Una radiodifusora de AM opera con una potencia de 10 kW y una frecuencia de portadora de 1 MHz. Se modula a 75% mediante un senoide de 1 kHz. La salida se conecta a una carga de 50 ohm.
- (a) Dibuje la salida del transmisor en el dominio de la frecuencia y señale una escala de frecuencia y una escala de potencia en watts.
- (b) Dibuje la salida del transmisor en el dominio del tiempo (muestra de la envolvente). Indique las escalas de tiempo y voltaje.
59. Un amplificador de potencia de un transmisor tiene una ganancia de 30 dB y una eficiencia de 75%. Su potencia de salida es de 100 W.
- (a) ¿Qué potencia de señal tiene que proporcionarse en la entrada?
- (b) ¿Cuánta corriente extrae el amplificador de una fuente de alimentación de 100 V?
- (c) Suponga que en este amplificador tiene que modularse la amplitud mediante una modulación de alto nivel. ¿Cuánta potencia debe suministrar el amplificador de audio para conseguir una modulación de 100%?
- (d) ¿Cuál será la potencia de salida con una modulación de 100% si se supone que la eficiencia es la misma con modulación y sin ella?
60. Los transmisores de SSB tienen amplificadores de potencia de Clase AB, en tanto que los transmisores de AM utilizan generalmente circuitos de Clase C más eficaces. Suponga que se usa una potencia de de total de 100W para alimentar las etapas finales de cada uno de los dos tipos de transmisores como sigue (para el transmisor de AM, los 100 W incluyen la potencia proporcionada al amplificador modulador):
- Transmisor 1: AM de portadora completa. El amplificador modulador es de Clase AB con 70% de eficiencia, el amplificador final es de Clase C con eficiencia de 85% y el índice de modulación es de 75%.
- Transmisor 2: SSB. El amplificador de potencia de RF es de Clase C con eficiencia de 65%.
- ¿Qué transmisor producirá una mejor relación señal a ruido en el receptor? ¿Por cuánto será mejor?
61. Un transmisor de SSB transmite en USB con una frecuencia de portadora (suprimida) de 7.2 MHz. Está modulado con dos tonos cuyas frecuencias son de 1 kHz y 2.5 kHz y amplitud igual. La PEP del transmisor es de 75 W con una carga de 50 ohm. La portadora y la banda lateral indeseable son suprimidas con 60 dB.
- (a) Calcule el voltaje de pico a través de la carga.
- (b) Calcule la potencia promedio en la carga.
- (c) Grafique la envolvente de la señal en el dominio del tiempo, y señale las escalas del voltaje y del tiempo.
- (d) Grafique la señal en el dominio de la frecuencia, y señale las escalas de la frecuencia y de la potencia.
62. Las radiodifusoras de FM comerciales tratan a menudo de sonar "más fuerte" que la competencia. Dentro del área de cobertura principal (es decir, la zona donde la señal es realmente fuerte en la antena del receptor), ¿cuál de los siguientes métodos será más eficaz para aumentar la "intensidad"?
- (a) Incrementar la potencia de portadora del transmisor.
- (b) Utilizar compresión de audio para aumentar la desviación promedio.
- Explique su respuesta.