

Cap3.2.- Modulación por medio de una señal de información compleja

En los párrafos previos a este tema, fueron analizados el espectro de frecuencia, ancho de banda, coeficiente de modulación y distribución de voltaje y potencia para una doble banda lateral con portadora completa AM para una señal modulante de frecuencia simple. Sin embargo, en la práctica, la señal modulante frecuentemente es una forma de onda compleja compuesta de muchas ondas senoidales con diferentes amplitudes y frecuencias. Consecuentemente, proporcionará un breve análisis sobre los efectos que una señal modulante tan compleja tendría en una forma de onda AM.

Si una señal modulante contiene dos frecuencias (f_{m1} y f_{m2}), la onda modulada contendrá la portadora y dos conjuntos de frecuencias laterales espaciadas simétricamente sobre la portadora. Dicha onda puede escribirse como

$$V_{am}(t) = \text{sen}(2\pi f_c t) + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_c - f_{m1})t] - \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_c + f_{m1})t] + \\ + \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_c - f_{m2})t] - \frac{1}{2} \cos [2\pi(f_c + f_{m2})t]$$

Cuando varias frecuencias modulan simultáneamente la amplitud de una portadora, el coeficiente de modulación combinado es la raíz cuadrada de la suma cuadrática de los índices de modulación individuales de la siguiente manera:

$$m_t = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_n^2} \quad (3-22) \text{ en donde } m_t =$$

coeficiente total de la modulación
 m_1, m_2, m_3 y m_n = coeficientes de modulación para las señales de entrada de información
 1, 2, 3 y n

El coeficiente de modulación combinado puede usarse para determinar potencias de la banda lateral total a transmitir de la siguiente manera:

$$P_{usbt} = P_{isbt} = \frac{P_c m_t^2}{4} \quad (3-24)$$

Por lo tanto

$$P_t = P_c \left(1 + \frac{m_t^2}{2}\right) \quad (3-25)$$

en donde

- P_{usbt} = potencia total de la banda lateral superior (watts)
- P_{isbt} = potencia total de la banda lateral inferior (watts)
- P_t = potencia total transmitida (watts)

En un transmisor de AM, debe tenerse el cuidado de asegurarse que los voltajes combinados de todas las señales de modulación no sobremodulen a la portadora.

EJEMPLO 3-5

Para un transmisor de AM DSBFC con una potencia de portadora no modulada $P_c = 100$ W que se modula simultáneamente por tres señales modulantes con coeficientes de modulación $m_1 = 0,2$; $m_2 = 0,4$ y $m_3 = 0,5$, determine:

- (a) Coeficiente de modulación total.
- (b) Potencia de la banda lateral superior e inferior.
- (c) Total de potencia transmitida.

Solución (a) El coeficiente total de la modulación se encuentra substituyendo en la ecuación 3-22.

$$m_t = \sqrt{0,2^2 + 0,4^2 + 0,5^2} = 0,67$$

(b) El total de la potencia de la banda lateral se encuentra substituyendo los resultados del paso (a) en la ecuación 3-24.

$$P_{sbl} = \frac{(0,67)^2 100}{2} = 22,445W$$

(c) El total de la potencia transmitida se encuentra substituyendo en la ecuación 3-25.

$$P_t = 100\left(1 + \frac{0,67^2}{2}\right) = 122,445W$$

CIRCUITOS DE MODULADORES DE AM

La ubicación de la modulación en un transmisor determina si un circuito es un *transmisor de alto o de bajo nivel*. Con la modulación de nivel bajo, la modulación se realiza antes del elemento resultante de la etapa final del transmisor, en otras palabras, antes del colector del transistor de potencia en un transmisor transistorizado; antes del drenaje de la salida del FET en un transmisor a FET o antes de la placa del tubo de salida en un transmisor de tubo de vacío.

Una ventaja de la modulación de bajo nivel es que para lograr un alto porcentaje de modulación se requiere menos potencia de la señal modulante. En los moduladores de nivel alto, la modulación se realiza en el elemento final o etapa final en donde la señal de la portadora está en su máxima amplitud y, por lo tanto, requiere de una señal modulante de amplitud mucho más alta para lograr una modulación de porcentaje razonable. Con la modulación de nivel alto, el amplificador de la señal modulante final debe suministrar toda la potencia de la banda lateral, el cual puede ser hasta 33% del total de la potencia de transmisión o el 50% de la potencia de la portadora. Una desventaja obvia de la modulación de nivel bajo está en las aplicaciones de potencia alta cuando todos los amplificadores que siguen a la etapa del modulador deben ser amplificadores lineales, lo cual es extremadamente ineficiente.

Modulador AM de nivel bajo

La figura 3-15 muestra el diagrama esquemático para un modulador simple de nivel bajo con un solo componente activo (Q_1) La portadora $[0,01 \text{ sen}(2\pi \times 10^5 t)]$ se aplica a la base del transistor y la señal modulante $[6 \text{ sen}2\pi(1000t)]$ al emisor. Por lo tanto, este método de modulación de nivel bajo se llama *modulación de emisor*. Con la modulación de emisor, es importante que el transistor sea polarizado en *clase A* con un *punto-Q* centrado. La señal modulante se multiplica con la portadora produciendo la modulación.

Operación del circuito. Con la modulación del emisor, la amplitud pico de la portadora (10mV) es mucho menor que la amplitud pico de la señal modulante (6 V) Si la señal modulante se remueve o se mantiene constante en 0V, Q_1 opera como un amplificador lineal. La señal de entrada a la base simplemente es amplificada e invertida 180° en el colector. La amplificación en Q_1 se determina por la relación de la resistencia del colector en ca (r_c con la resistencia

del emisor en ca (r_e) (es decir, $A_v = r_c/r_e$) Para los valores de los componentes mostrados, r_c y r_e se determinan de la siguiente manera:

R_c = combinación en paralelo de R_c y R_L

$$= \frac{(10.000)(2000)}{12.000} = 1667\Omega$$

$$r_e' = \frac{25mV}{I_E}$$

$$I_E = \frac{V_{th} - V_{be}}{\left(\frac{R_{th}}{\beta}\right) + R_E}$$

en donde

$$V_{th} = \frac{V_{cc} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{30(10000)}{30000} = 10V$$

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 6667\Omega$$

Por lo tanto, para un típico $\beta = 100$,

$$I_E = \frac{10 - 0,7}{\left(\frac{6667}{100}\right) + 10000} = 0,924mA$$

$$r_e' = \frac{25mV}{0,924mA} = 27\Omega$$

$$A_q = \frac{r_c}{r_e} = \frac{1667}{27} = 61,7$$

en donde A_q = ganancia de voltaje en reposo (o en operación)

En esencia *quiescent* significa reposo, en este caso. En términos de circuitos electrónicos significa un punto de estabilidad, en la cual empezará a trabajar un dispositivo transistorizado. Por lo general, se le llama *punto de operación* o punto Q.

Sin señal de entrada modulante, Q_1 es un amplificador lineal con una ganancia de voltaje en operación de $A_q = 61.7$. Con un voltaje de entrada de la portadora $V_c = 10 mV$, el V_{salida} es

$$V_{salida} = A_q V_{entrada} = 61.7(0.01 V) = \mathbf{0.617 V}$$

Cuando la señal modulante $[V_m(t)]$ se aplica al circuito, su voltaje se combina con el voltaje de Thévenin en c.c. El resultado es un voltaje polarizado que tiene un término constante y un término que varía con una razón sinusoidal de baja frecuencia igual a la frecuencia de la señal modulante. Por lo tanto

$$V_{polarizado} = V_{th} + V_{entrada}$$

Para este ejemplo,

$$V_{polarizado} = 10 + 6\text{sen}(2\pi 1000t)$$

Para analizar la operación de este circuito, no es necesario considerar cada valor posible de V_{bias} . En cambio, el circuito se analiza usando varios valores claves para V_{entrada} y los otros puntos se interpolan en ellos. Los tres valores más significativos para $V_{\text{polarizado}}$ son: cuando la señal de entrada es $0V$, máximo positivo y máximo negativo. Cuando $V_m = 0V$ el voltaje polarizado es igual al voltaje de Thévenin y la ganancia de voltaje es el valor en operación,

$$A_v = A_q = 61,7$$

Cuando la señal modulante es la máxima y negativa,

$$V_{\text{entrada}} = -6$$

$$V_{\text{polarizado}} = V_{th} - V_{\text{entrada}} = 10 - (-6) = 16V$$

$$I_E = \frac{16 - 0,7}{\frac{(6667)}{(100)} + 10.000} = 1,52mA$$

$$r'_e = \frac{25mV}{1,52mA} = 16,45\Omega$$

$$A_v = A_{\text{max}} = \frac{1667}{16,45} = 101,3$$

$$V_{\text{salida}} = A_{\text{max}} V_{\text{entrada}} = (0,01)(101,3) = 1,013V$$

Cuando la señal modulante es la máxima y positiva

$$V_{\text{entrada}} = +6$$

$$V_{\text{polarizado}} = V_{th} - V_{\text{entrada}} = 10 - (+6) = 4V$$

$$I_E = \frac{4 - 0,7}{\frac{(6667)}{(100)} + 10.000} = 0,328mA$$

$$r'_e = \frac{25mV}{0,328mA} = 76,3\Omega$$

$$A_v = A_{\text{min}} = \frac{1667}{76,3} = 21,9$$

$$V_{\text{salida}} = A_{\text{max}} V_{\text{entrada}} = (0,01)(21,9) = 0,219V$$

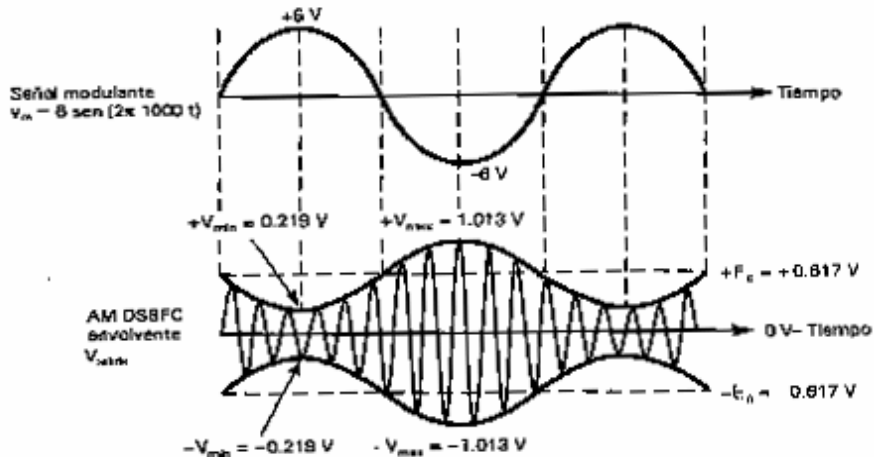
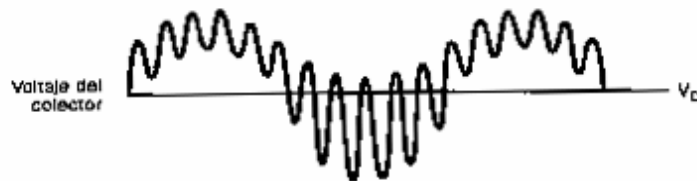
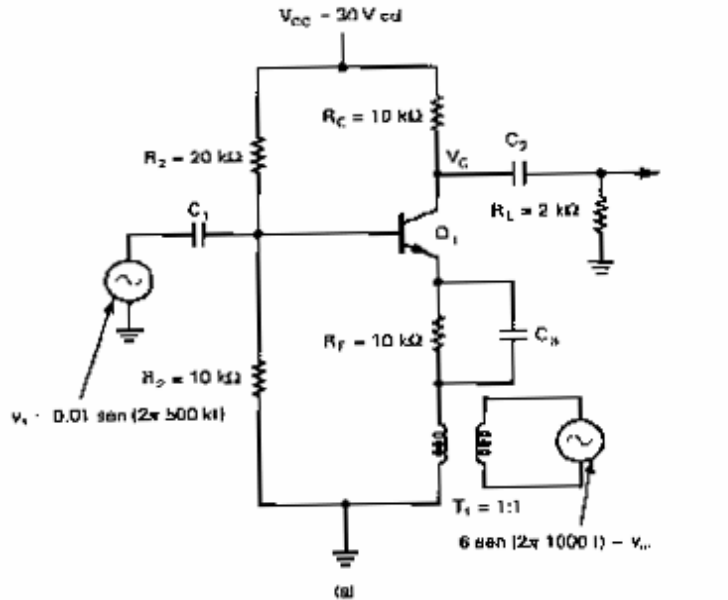


Figura 3-15. a) Modulador de emisor simple. b) Formas de onda

En el ejemplo anterior, la ganancia de voltaje varió en una razón sinusoidal igual a la frecuencia de la señal modulante (1000 Hz) de un valor de punto Q $A_q = 61.7$ a un máximo valor de $A_{max} = 101.3$ y después a un mínimo valor $A_{min} = 21.9$. Consecuentemente, el voltaje de ca resultante varía de un mínimo valor de 0,219 V a un máximo valor de 1,103V. El voltaje del colector en c.c. V_c y forma de onda del voltaje resultante de ca se muestran en la figura 3-15b. La forma de onda para $V_{salida}(t)$ es una señal de portadora de amplitud variante funcionando arriba de la señal modulante de **frecuencia baja**. El voltaje promedio es igual al voltaje de c.c. del colector en el punto Q V_c . El voltaje de c.c. y la señal modulante de frecuencia baja se eliminan de la forma de onda por un capacitor de acoplamiento C_2 . Consecuentemente, la forma de onda de

salida desarrollada a través de una R_L es la portadora modulada con un voltaje promedio igual a 0V, la amplitud de la portadora no modulada de 0.617 V, una máxima amplitud positiva o negativa de ± 1.013 V y una mínima amplitud positiva o negativa de ± 0.219 V. Es interesante observar que con la modulación de emisor la máxima amplitud de la envolvente ocurre cuando la señal modulante es máxima negativa y la mínima amplitud de la envolvente ocurre cuando la señal modulante es máxima positiva.

Del ejemplo anterior, se puede observar que la ganancia de voltaje varía con una razón sinusoidal igual a la frecuencia de la señal modulante f_m . Por lo tanto, la ganancia de voltaje puede expresarse matemáticamente como

$$A_v = A_q[1 + m \sin(2\pi f_m t)]$$

Sen $(2\pi f_m t)$ va desde un máximo valor de +1 a un mínimo valor de -1. Por lo tanto

$$A_v = A_q(1 \pm m) \quad (3-26)$$

en donde m = coeficiente de modulación.

Por lo tanto, en modulación 100%, $m = 1$ y

$$A_{\max} = A_q(1 + 1) = 2 A_q$$

$$A_{\min} = A_q(1 - 1) = 0$$

y las amplitudes máximas y mínimas para V_{salida} son

$$V_{\text{salida(max)}} = 2A_q V_{\text{entrada}}$$

Para el ejemplo anterior, el coeficiente de modulación es

$$m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}} = \frac{1,013 - 0,2195}{1,013 + 0,2195} = 0,645$$

Sustituyendo en la ecuación 3-26 proporciona

$$A_{\max} = 61.7(1 + 0.64) = 101.5$$

$$A_{\min} = 61.7(1 - 0.645) = 21.9$$

En el ejemplo anterior, la ganancia de voltaje cambió simétricamente con la modulación. En otras palabras, el incremento en la ganancia durante el medio ciclo negativo de la señal modulante es igual a la disminución en la ganancia durante el medio ciclo positivo. La ganancia de voltaje es aproximadamente $A_q \pm 40$. Esto se llama modulación lineal o simétrica y es deseada. Esencialmente, un receptor de AM DSBFC convencional reproduce la señal de modulación original a partir de la forma de la envolvente. Si la modulación no es simétrica, la envolvente no representa correctamente la forma de la señal modulante y el demodulador producirá una forma de onda de salida distorsionada.

EJEMPLO 3-6

Para un modulador de AM de nivel bajo similar al que fue mostrado en la figura 3-15 con un coeficiente de modulación $m = 0.8$, una ganancia de voltaje (quiescent) $A_q = 100$, una frecuencia de portadora de entrada $F_c = 500$ kHz con una amplitud $V = 5$ mV y una señal modulante de 1000 Hz, determine:

- (a) Las ganancias de voltaje máximo y mínimo.
- (b) Amplitudes máximas y mínimas para V_{salida} .
- (c) Trace la envolvente de AM de salida.

Solución (a) Sustituyendo en la ecuación 3-26.

$$A_{\max} = 100(1 + 0.8) = 180$$

$$A_{\min} = 100(1 - 0.8) = 20$$

(b) $V_{\text{salida}(\max)} = 180(0.005) = 0.9 \text{ V}$

$$V_{\text{salida}(\min)} = 20(0.005) = 0.1 \text{ V}$$

(c) La envolvente de AM se muestra en la figura 3-16.

Sin señal modulante, el modulador de bajo nivel mostrado en la figura 3-15 es un amplificador lineal. Sin embargo, cuando se aplica una señal modulante, el punto Q del amplificador se dirige primero hacia la saturación y después hacia el punto de corte (es decir, el transistor es forzado a operar en una porción no lineal de su curva operativa)

El modulador de transistor mostrado en la figura 3-15 es adecuado para las aplicaciones de baja potencia pero no es un circuito práctico cuando son requeridas potencias de salida altas. Esto es porque el transistor se polariza para una operación de clase A, la cual es

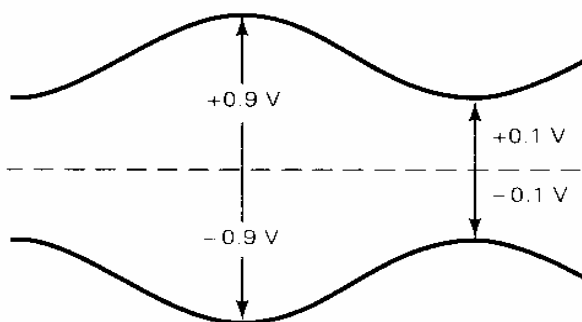


Figura 3-16 La envolvente de AM para el ejemplo 3-6.

extremadamente ineficiente. Además, debido a que las características del transistor no son las mismas cuando se llevan al punto de corte como cuando se dirigen a la saturación, la envolvente de salida no es simétrica. Además, la onda de salida contiene componentes armónicos y de productos cruzados de la señal modulante, la portadora y sus frecuencias armónicas. Aunque la mayoría de las frecuencias no deseadas se pueden remover con filtros, cualquiera de los amplificadores que siguen a un modulador de AM deben ser lineales. Si no lo son, la intermodulación entre las frecuencias laterales superiores e inferiores y la portadora generarán frecuencias de producto cruzado adicionales que podrían interferir con señales de otros transmisores. Los amplificadores lineales de alta potencia son altamente indeseables debido a su pobre eficiencia. El modulador mostrado en la figura 3-15 es un modulador de bajo nivel sin importar si está en la etapa final o no, puesto que la modulación se realiza en el emisor, el cual no es el elemento de salida.

Modulador de AM de potencia media

Los primeros transmisores de AM de potencia media y alta estaban limitados a los que usaban tubos de vacío para los dispositivos activos. Sin embargo, desde la mitad de la década de 1970, los transmisores de estado sólido han estado disponibles con potencias de salida tan altas como varios miles de watts. Esto se logra colocando varios amplificadores de potencia final en paralelo para que sus señales de salida combinen en fase y sean por lo tanto aditivos.

La figura 3-17a muestra un diagrama esquemático para un modulador de AM de potencia media de transistor simple. La modulación se realiza en el *colector*, el cual es el elemento de salida del transistor. Por lo tanto, si esta es la última etapa activa del transmisor (es decir, no hay amplificadores entre él y la antena), no es un modulador de nivel bajo.

Para lograr una eficiencia de potencia alta, los moduladores de AM de potencia media y alta normalmente operan en clase C. Por lo tanto, es posible una eficiencia práctica tan alta como 80%. El circuito mostrado en la figura 3-17a es

un amplificador de clase C con dos entradas: una portadora (v_c) y una señal modulante de frecuencia simple (v_m) Debido a que el transistor se polariza en clase C, opera de manera no lineal y es capaz de mezclar (modulación) Este circuito se llama *modulador de colector* porque la señal de modulación se aplica directamente al colector. El RFC es un choque de radiofrecuencia que actúa como un corto en c.c. y un circuito abierto a altas frecuencias. Por lo tanto, el RFC aísla la fuente de poder de c.c. de la portadora de alta frecuencia y frecuencias laterales, mientras que aún permite que las señales inteligentes de frecuencia baja modulen al colector de Q,

Operación del circuito.

Para la siguiente explicación, refiérase al circuito mostrado en la figura 3-17a y las formas de onda mostradas en la figura 3-17b. Cuando la amplitud de la portadora excede el potencial de umbral de la unión base-emisor (aproximadamente 0.7 V para un transistor de silicio), Q_1 se enciende y la corriente del colector fluye. Cuando la amplitud de la portadora cae abajo de 0.7 V, Q_1 se apaga y cesa la corriente del colector. Consecuentemente, Q_1 cambia entre la saturación y el punto de corte controlado por la señal de la portadora, la corriente del colector fluye por **menos** de 180° en cada ciclo de la portadora, y se logra la operación de clase C. Cada ciclo sucesivo de la portadora enciende a Q_1 por un instante y permite que la corriente circule por un corto tiempo, produciendo una forma de onda negativa en el colector. La corriente del colector y las formas de onda del voltaje se muestran en la figura 3-17b. La forma de onda del voltaje del colector es semejante a la señal rectificadora de media onda repetitiva con una frecuencia fundamental igual a f_c .

Cuando una señal modulante se aplica al colector **en serie** con el voltaje de la fuente de poder de c.c., se agrega y se resta de V_{cc} . Las formas de ondas mostradas en la figura 3-17c son producidas cuando la máxima amplitud pico de la señal modulante es igual a V_{cc} . Puede verse que la forma de onda del voltaje resultante cambia de un máximo valor de $2V_{cc}$ a aproximadamente 0 V [$V_{ce(sat)}$] La variación pico en el voltaje del colector es igual a V_{cc} . Nuevamente, la forma de onda se asemeja a una portadora de media onda rectificadora sobrepuesta a una señal inteligente en ca de frecuencia inferior.

Debido a que Q, trabaja en forma no lineal, la forma de onda del colector contiene las dos frecuencias de entrada originales (f_c y f_m) y sus frecuencias de suma y diferencia ($f_c \pm f_m$) Debido a que la forma de onda de salida también contiene la armónica de orden más alta y los componentes de intermodulación, debe limitarse la banda a $f_c \pm f_m$ antes de ser transmitida.

Un circuito más práctico para producir una señal AM DSBFC de potencia mediana se muestra en la figura 3-18a, con las formas de onda correspondientes mostradas en la figura 3-18b. Este circuito también es un modulador de colector con una máxima amplitud pico de la señal modulante $V_m(\max) = V_{cc}$. La operación de este circuito es casi idéntica al circuito mostrado en la figura 3-17a excepto por la adición de un circuito tanque (C_1 y L) en el colector de Q_1 . Debido a que el transistor está operando entre la saturación y el punto de corte, la corriente del colector no depende del voltaje de excitación de la base. El voltaje desarrollado a través del circuito tanque se determina por el componente en **ca** de la corriente del colector y la resistencia del circuito tanque en resonancia, el cual depende del factor de calidad (Q) de la bobina.

Las formas de onda para la señal modulante, portadora y corriente de colector son idénticas a las del ejemplo anterior. El voltaje de salida de información es una señal AM DSBFC simétrica con un voltaje promedio de 0 V, una máxima amplitud pico positiva igual a $2V_{cc}$ y una máxima amplitud pico negativa igual a $-2V_{cc}$.

El medio ciclo positivo de la forma de onda de salida se produce en el circuito tanque por el *efecto volante*. Cuando Q_1 conduce, C_1 se carga a $V_{cc} + V_m$ (un valor máximo de $2V_{cc}$ y, cuando Q_1 está apagado, C_1 se descarga por L_1) Cuando L_1 descarga, C_1 se carga a un valor mínimo de $-2V_{cc}$. Esto produce el medio ciclo positivo de la envolvente AM. La frecuencia resonante del circuito tanque es igual a la frecuencia de la portadora y el ancho de banda se extiende desde ($f_c - f_m$) a ($f_c + f_m$). Consecuentemente, la señal modulante, las armónicas y todos los productos cruzados de orden superior se remueven de la forma de onda, dejando una onda AM DSBFC simétrica. La modulación al cien por cien ocurre cuando la máxima amplitud de la señal modulante AM se iguala a V_{cc} .

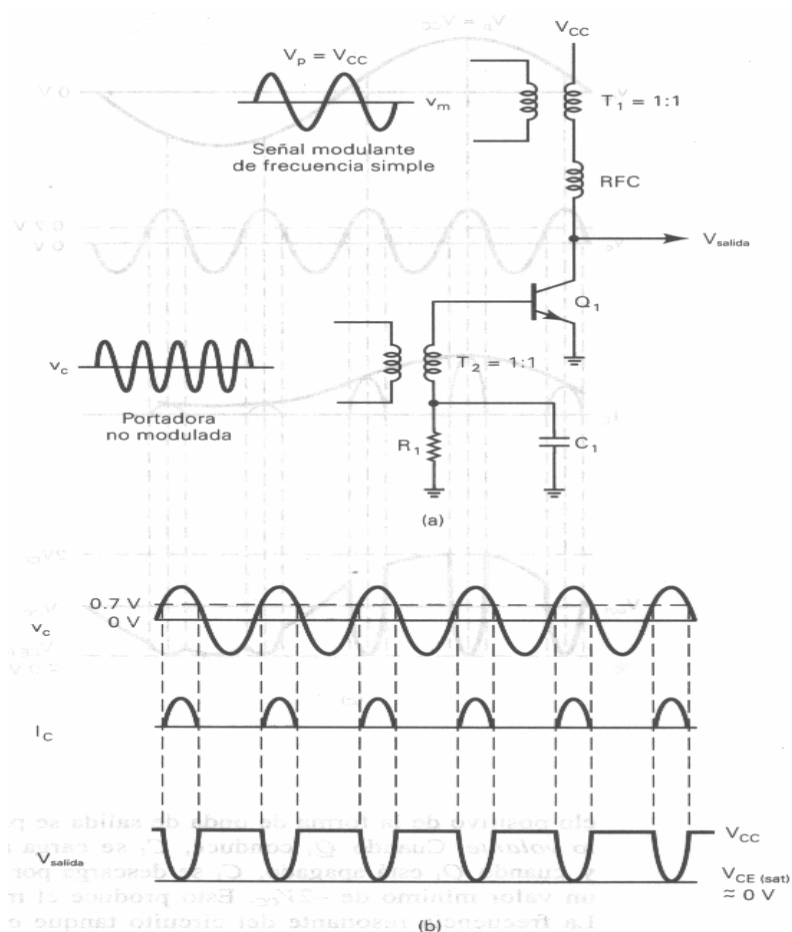


Fig. 3-17 Modulador de AM DSBFC de transistor de potencia media simplificado; (a) diagrama esquemático; (b) formas de onda de colector sin señal modulante.

Varios componentes mostrados en la figura 3-18a no han sido explicados. R_1 es la resistencia de polarización para Q1. R_1 y C_2 forman un circuito enclavador que produce "auto" polarización inversa y, en conjunto con el potencial de la barrera del transistor, determinan el voltaje de encendido para Q1. Consecuentemente, Q1 puede ser polarizado para encenderse solamente durante los picos más positivos del voltaje de la portadora. Esto produce una forma de onda de corriente del colector angosta y mejora la eficiencia de la clase C.

C_3 es un capacitor de desvío de RF (bypass) que se observa como un corto en las frecuencias de la señal modulante, previniendo que las señales de información entren a la fuente de poder de c.c. C_1 es el capacitor de la juntura de base a colector de Q1. En radiofrecuencias, las capacitancias relativamente pequeñas de juntura dentro del transistor son insignificantes. Si la reactancia capacitiva de C_1 es significativa, la señal del colector puede regresar a la base con suficiente amplitud para causar que Q1 comience a oscilar.

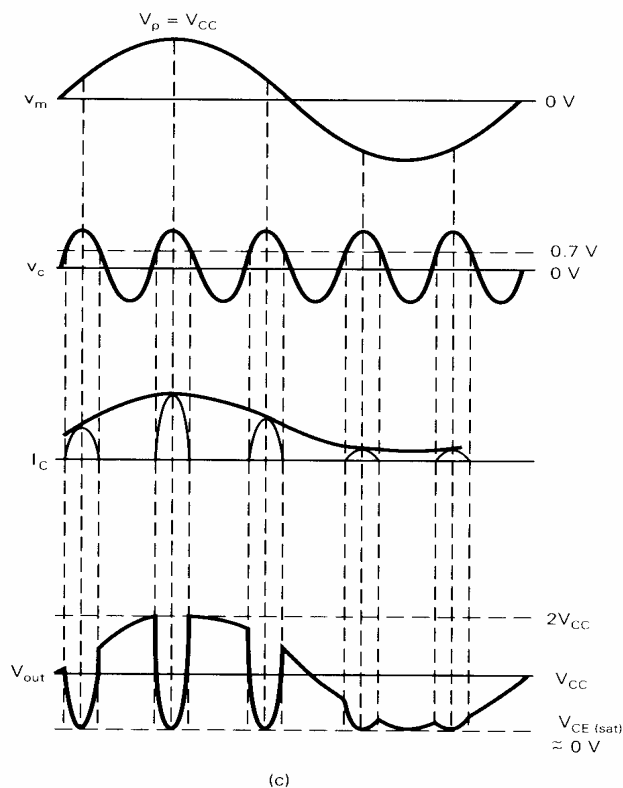


Figura 3-17 (continuación)
(c) formas de onda del colector con señal modulante.

Por lo tanto, una señal de igual amplitud y frecuencia y 180° fuera de fase, debe retroalimentarse a la base para cancelar o *neutralizar la retroalimentación de capacidad interna*. C_N es un *capacitor neutralizante*. Su propósito es proporcionar un camino de retroalimentación para una señal que sea igual en amplitud y frecuencia pero 180° fuera de fase con la señal regresada por C_1 . C_4 es un capacitor de bypass de RF. Su propósito es aislar la fuente de poder de c.c. de las radiofrecuencias. Su funcionamiento es bastante similar: en la frecuencia de la portadora, C_4 parece un corto circuito a tierra, previniendo a la portadora *pasar a* la fuente de poder o a los circuitos de la señal modulante y distribuirse por el transmisor.

Modulación de colector y de base simultáneas

Los moduladores de colector producen una envolvente más simétrica que los moduladores de emisor de potencia baja, y los moduladores de colector son más eficientes en potencia. Sin embargo, los moduladores de colector requieren de una señal modulante de amplitud más alta y no pueden lograr una oscilación de voltaje de salida desde saturación al punto de corte, logrando que ocurra la modulación al 100%. Por lo tanto, para lograr la modulación simétrica, operar a su máxima eficiencia, desarrollar una alta potencia de salida y requerir la menor cantidad posible de potencia del amplificador de la señal modulante, se usan a veces las modulaciones de emisor y colector simultáneamente.

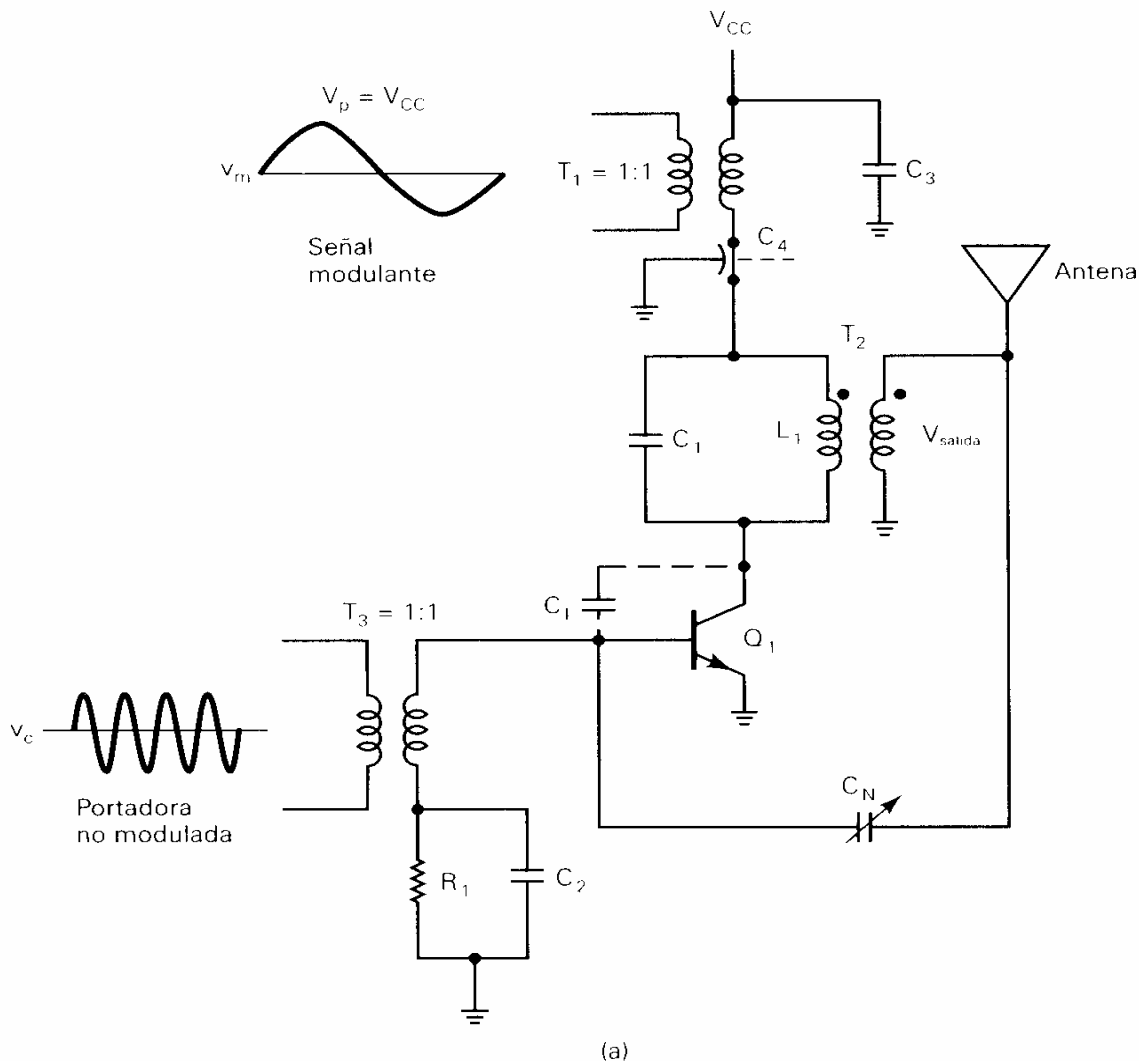


Figura 3-18 Modulador de AM DSBFC de transistor de potencia media (a) Circuito

Operación del circuito. La figura 3-19 muestra un modulador de AM que utiliza una combinación de modulaciones de emisor y colector. La señal de modulación se alimenta simultáneamente a los colectores de los moduladores de push-pull (Q2 y Q3) y al colector del amplificador del excitador (Q1). La modulación de colector ocurre en Q1; por lo tanto, la señal de la portadora sobre la base de Q2 y Q3 ya ha sido modulada parcialmente y la potencia de la señal modulante puede reducirse. Además, los moduladores no se requieren para operar sobre toda la curva de operación para lograr el 100% de modulación.

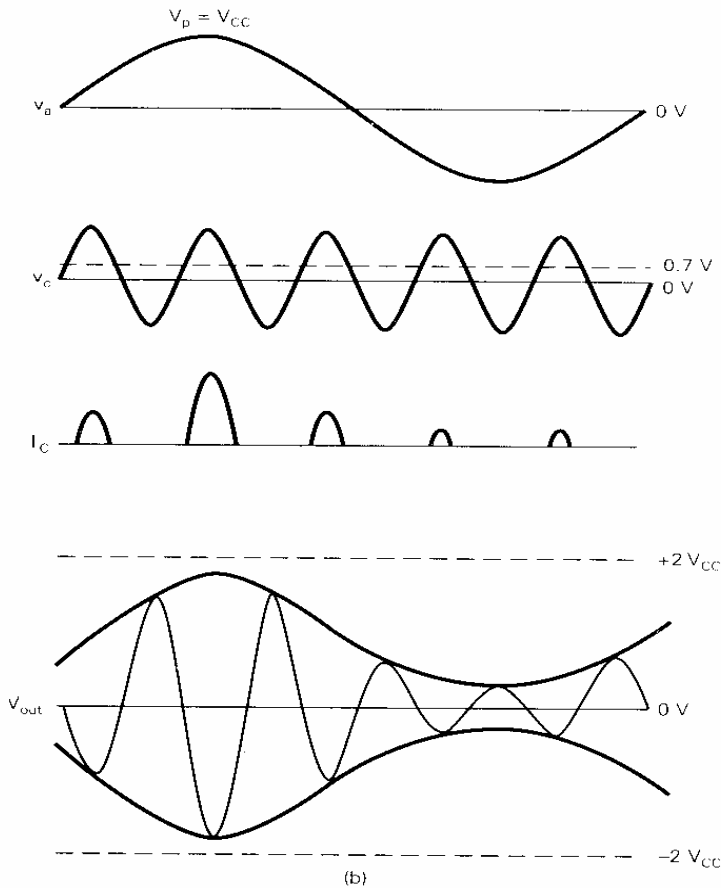


Figura 3-18 (continuación)
(b) formas de onda del colector y salida.

Moduladores de AM de circuito integrado lineal

Los generadores de funciones de circuito integrado lineal utilizan un arreglo único de transistores y FET para realizar la multiplicación de señales. Esta característica los hace que sean idealmente adecuados para generar formas de onda AM. Los circuitos integrados, a diferencia de sus contrapartes discretas, pueden acoplarse en forma muy precisa al flujo de la corriente, ganancia de voltaje del amplificador y variaciones de temperatura. Los moduladores de AM de circuito integrado lineal también ofrecen una excelente estabilidad en frecuencia, características de modulación simétricas, miniaturización del circuito, menos componentes, inmunidad de la temperatura y simplicidad de diseño. Sus desventajas incluyen baja potencia de salida, un rango de frecuencia relativamente de baja utilidad y susceptibilidad a las fluctuaciones en la fuente de voltaje de c.c..

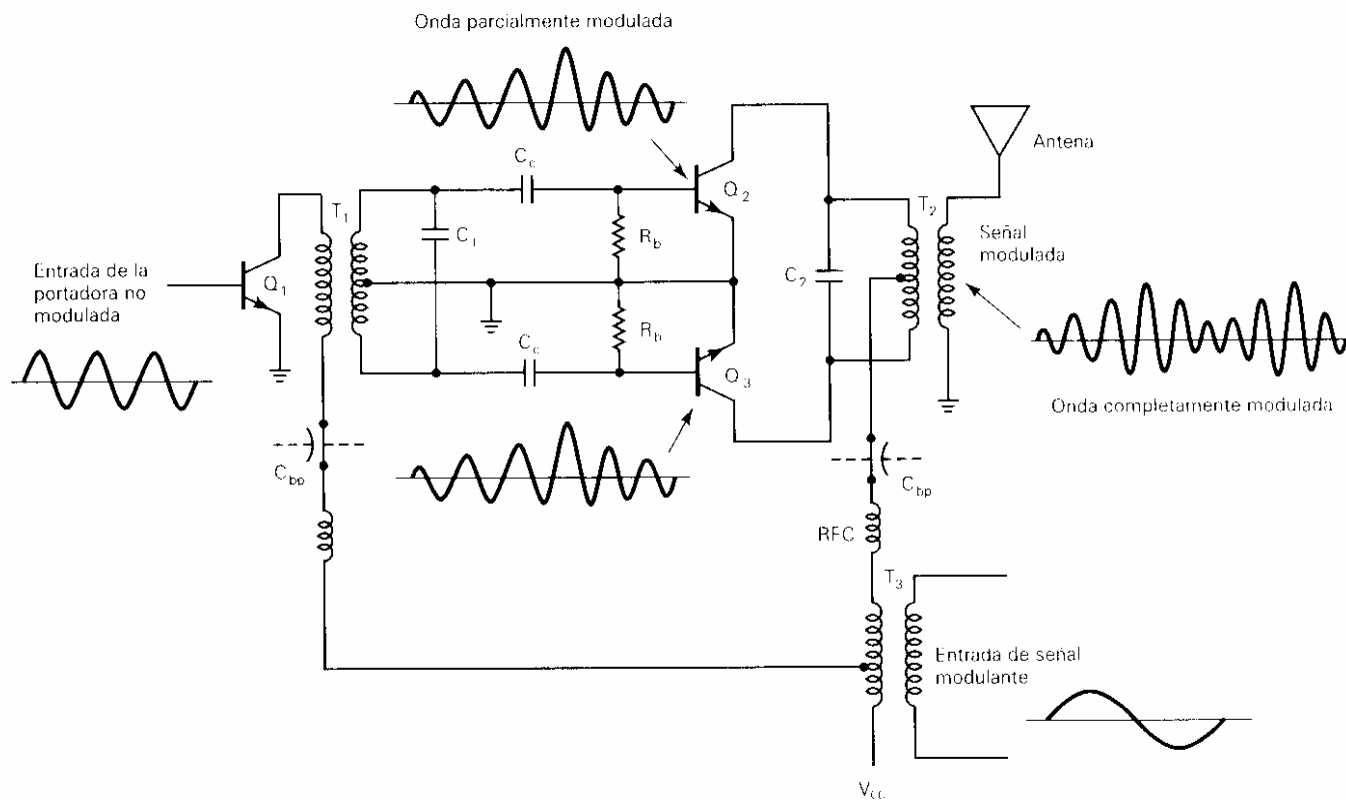


Figura 3-19 Modulador de transistor de AM DSBFC de alta potencia.

Operación del circuito. El generador de funciones monolítico XR-2206 está idealmente equipado para realizar la modulación de amplitud. La figura 3-20a muestra el diagrama esquemático para un modulador de AM de circuito integrado que utiliza el XR-2206. La frecuencia que opera sin limitaciones de VCO en el generador de funciones XR-2206 es la portadora, y su frecuencia se determina por un capacitor de tiempo externo C_1 y resistor R_1 . La señal de modulación se aplica al pin 1, y la envoltura de AM que resulta aparece en el pin 2. La figura 3-20b muestra la amplitud de salida normalizada contra las características de voltaje de polarización de entrada para el VCO. La amplitud del voltaje de salida varía de manera lineal con el voltaje aplicado para los valores entre ± 4 V de $V^+/2$. Debido a que la amplitud de salida es proporcional a la fuente de voltaje de V^+ , una fuente de c.c. bien regulada debe usarse con esta configuración.

Moduladores de AM de tubo de vacío

Con la llegada de los moduladores de AM de potencia media y alta de estado sólido, los *circuitos de tubo de vacío* se han ido rezagando del camino excepto para las aplicaciones especializadas que requieren una potencia de transmisión de manera excepcionalmente alto. Los moduladores de tubo de vacío tienen varias desventajas comparados con los moduladores de estado sólido. Los tubos de vacío requieren de fuentes de voltajes de c.c. más altos (a menudo, las polaridades positivas y negativas para un solo circuito), una fuente de voltaje de *filamento* separado (*calentador*), y amplitudes de señal modulante muy altas y los tubos de vacío ocupan considerablemente más espacio y mucho más peso que sus contrapartes de estado sólido.

Consecuentemente, un modulador de tubo de vacío (o, cualquier otro circuito de tubo de vacío) poco se utiliza actualmente. Esencialmente, los moduladores de tubo de vacío se utilizan en las aplicaciones donde se requieren potencias extremadamente altas, tal como en los transmisores comerciales de AM y de la banda de radiodifusión de televisión. Para las aplicaciones más comunes de una potencia baja y media, como para las comunicaciones de radio de dos sentidos, los transmisores de estado sólido dominan el mercado.

Para una perspectiva histórica (es decir, regresar a la era *cavertrónica*), varios moduladores de AM de tubo de vacío se muestran en la figura 3-21. Asumiendo que el lector está familiarizado con la terminología de tubo de vacío (placas, rejillas, cátodo, filamentos, triodo, pentodo, etc.), la operación de los moduladores de tubo de vacío es muy parecida a los moduladores de transistor comparables. De este modo, debido a que hay más elementos en un tubo de vacío, más configuraciones del modulador son posibles con los tubos de vacío que con los transistores o circuitos integrados (por ejemplo, moduladores de supresor y líneas divisoras)

Los *moduladores de triodo* de tubo de vacío de alto nivel de clase C se polarizan y utilizan la modulación de posición (figura 3-21 a) Una señal modulante de alta potencia se acopla a un transformador en el circuito de la placa en serie con la fuente voltaje de cd. Consecuentemente, la señal de modulación agrega y subtrae de Ebb. Una señal de portadora de potencia relativamente baja se acopla en el circuito de rejilla, donde polarizará el tubo a conducción sólo durante sus picos más positivos. Por lo tanto, como con los moduladores de colector de transistor, el flujo de corriente de la placa c.c. suministra pulsos angostos la energía necesaria para sostener oscilaciones en el circuito tanque de la placa.

La figura 3-21b muestra un modulador de placa de tubo de vacío de *rejilla múltiple*. El tubo de vacío es un *pentodo*. Tiene cinco elementos: placa, cátodo, rejillas de control, rejillas supresoras y rejillas de pantalla. Los moduladores de tubo de vacío de pentodo tienen capacidad de potencias de salida alta y altas eficiencias. Sin embargo, para lograr el 100% de modulación, es necesario modular las rejillas de pantalla así como la placa.

La figura 3-21c muestra un *modulador de rejillas*. El triodo puede reemplazarse con un *tetrodo* o pentodo. El modulador de rejillas requiere mucho menos potencia de señal modulante que los moduladores de placa del triodo o pentodo, pero tiene una simetría de modulación más pobre, más distorsión y una eficiencia de placa inferior y produce una potencia de salida baja.

Las figuras 3-21 d y e muestran los moduladores de *rejilla de pantalla* y *rejillas separadas*, respectivamente. Estas dos configuraciones de modulador caen entre los moduladores de polarización de rejilla y de placa discutidos previamente.

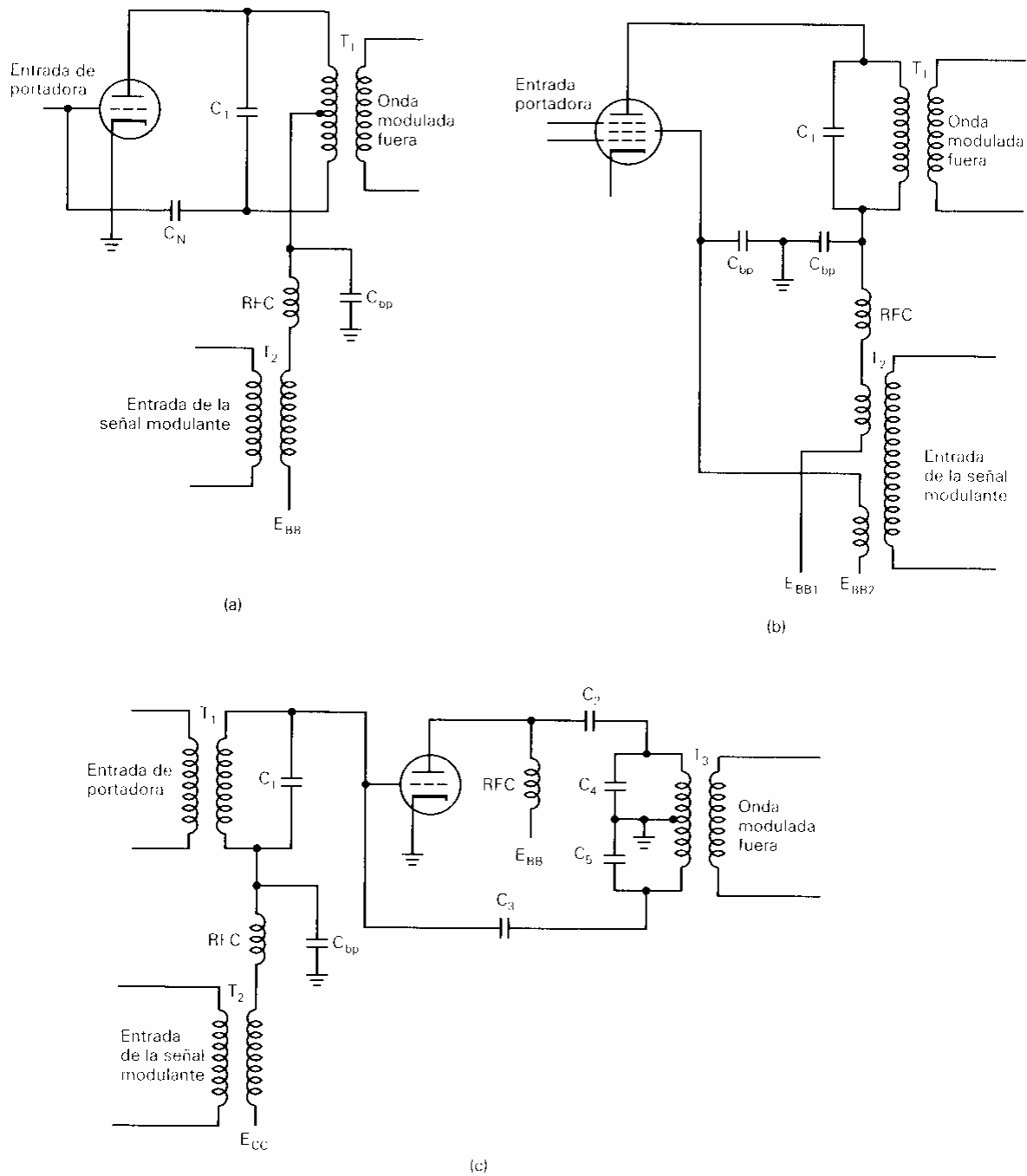


Figura 3-21 Circuitos de modulador de AM DSBFC de tubo de vacío: (a) modulador de placa de triodo; (b) modulador de placa de rejilla múltiple; (c) modulador de polarización de rejilla

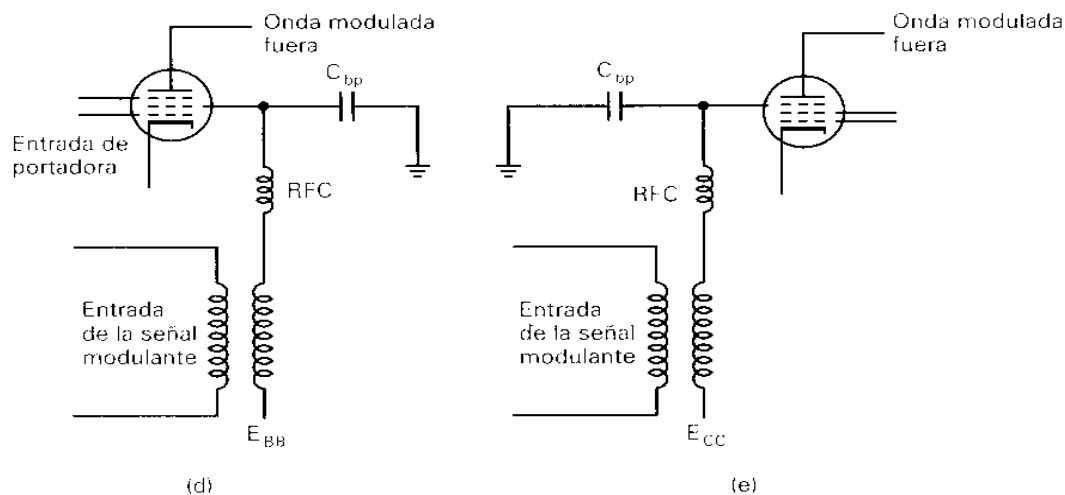


Figura 3-21 (continuación) (d) modulador de rejilla de pantalla; (e) modulador supresores de rejilla.

TRANSMISORES DE AM

Transmisores de bajo nivel

La figura 3-22 muestra un diagrama en bloques para un transmisor de AM DSBFC de bajo nivel. Para la transmisión de voz o música, la fuente de la señal modulante generalmente es un transmisor y traductor acústico, tal como un micrófono, cinta magnética, un disco CD o un disco fonográfico. El *preamplificador* normalmente es un amplificador de voltaje lineal de clase A sensible con una alta impedancia de entrada. La función del preamplificador es levantar la amplitud de la señal de la fuente a un nivel utilizable mientras produce la mínima cantidad de distorsión no lineal y agrega la menor cantidad de ruido térmico posible. El excitador para la señal de modulación es también un amplificador lineal que simplemente amplifica la señal a un nivel adecuado para manejar de manera suficiente al modulador. Se requiere más de un controlador para amplificador.

El *oscilador de portadora de RF* puede ser cualquiera de las configuraciones de oscilador discutidas anteriormente. Las normas tienen requerimientos estrictos sobre la exactitud y estabilidad del transmisor; por lo tanto, los osciladores controlados por cristales son los circuitos más comúnmente utilizados. El *amplificador de búfer* es un amplificador lineal de impedancia de entrada alta y de ganancia baja. Su función es aislar al oscilador de los amplificadores de alta potencia. El búfer proporciona una carga relativamente constante al oscilador, la cual ayuda a reducir la ocurrencia y magnitud de las variaciones de la frecuencia de corto término. Frecuentemente se usan para el búfer los seguidores de emisor o los opamps de circuito integrado. El modulador puede utilizar la modulación de emisor o de colector. Los amplificadores de potencia intermedia y final son de clase A lineal o clase B push-pull. Esto se requiere en los transmisores de bajo nivel para mantener simetría en la envolvente de AM. La red de acoplamiento de la antena acopla la impedancia de salida del amplificador de potencia final a la línea de transmisión y antena.

Los transmisores de bajo nivel como el mostrado en la figura 3-22 se utilizan de manera predominante para los sistemas de baja capacidad y baja potencia tal como los teléfonos inalámbricos, unidades de control remoto, beepers y radiotelefonos portátiles, de corto alcance.

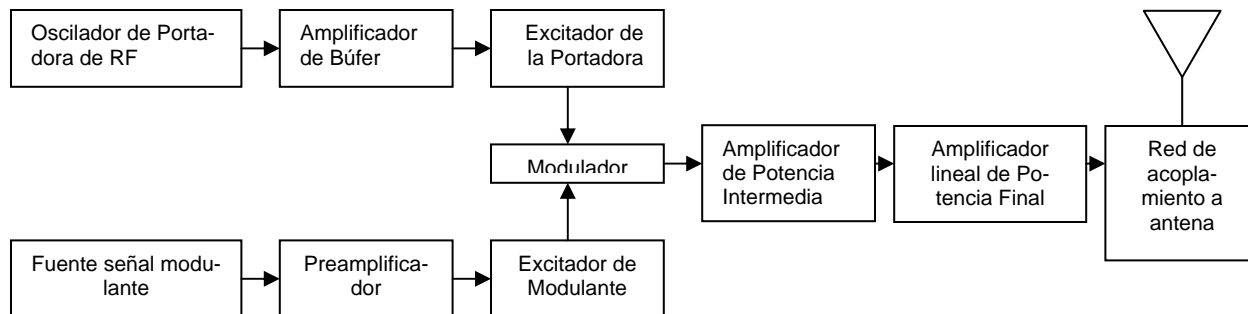


Figura 3-22 Transmisor de AM DSBFC de bajo nivel

Transmisores de alto nivel

La figura 3-23 muestra el diagrama en bloques para un transmisor AM DSBFC de alto nivel. La señal modulante se procesa de la misma manera que el transmisor de bajo nivel excepto por la adición de un amplificador de potencia. Con los transmisores de alto nivel, la potencia de la señal modulante debe ser considerablemente más alta que lo necesario para los transmisores de bajo nivel. Esto se debe a que la portadora está a su potencia total en el punto donde ocurre la modulación en el transmisor y, consecuentemente, requiere que una señal modulante de gran amplitud produzca el 100% de modulación.

El oscilador de portadora RF, su búfer asociado y el excitador de la portadora también son esencialmente los mismos circuitos utilizados en los transmisores de bajo nivel. Sin embargo, con los transmisores de alto nivel, la portadora de RF pasa por una amplificación de potencia adicional antes de la etapa del modulador, y el amplificador de potencia final también es el modulador. Consecuentemente, el modulador generalmente es un amplificador de clase C modulado en drenaje, placa, o colector.

Con los transmisores de alto nivel, el circuito del modulador tiene tres funciones principales. Proporciona la circuitería necesaria para que la modulación ocurra (es decir, no lineal), es el amplificador de potencia final (clase C para eficiencia) y es un convertidor ascendente de frecuencia. Un convertidor ascendente simplemente traduce las señales inteligentes de baja frecuencia a señales de radio frecuencia que puedan radiarse eficientemente de una antena y propagarse por el espacio libre.

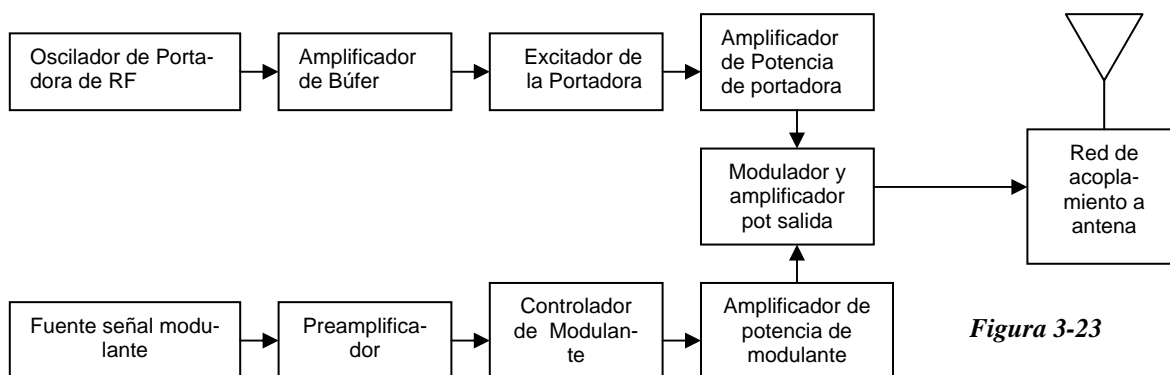


Figura 3-23

PREGUNTAS DE REPASO DE MODULACIÓN DE AMPLITUD

- 3-1. Defina *modulación de amplitud*.
- 3-2. ¿Qué quiere decir el término RF?
- 3-3. ¿Cuántas entradas hay en un modulador de amplitud? ¿Cuáles son?
- 3-4. ¿En un sistema AM, que quieren decir los siguientes términos: *señal modulante*, *portadora* y *onda modulada*?
- 3-5. Describa una forma de onda de AM DSBFC. ¿Por qué se llama envolvente a la forma de las variaciones de amplitud?

3-6. Describa las bandas lateral superior e inferior y las frecuencias laterales superior e inferior.

3-7. Defina *coeficiente de modulación*.

3-8. Defina *porcentaje de modulación*.

3-9. ¿Cuáles son el coeficiente de modulación y porcentaje de modulación más altos que pueden ocurrir sin causar una distorsión excesiva?

3-10. Describa el significado de cada término en la siguiente ecuación

$$V_{am}(t) = E_c \sin(2\pi f_c t) - \frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$$

3-11. Describa el significado de cada término en la siguiente ecuación

$$V_{am}(t) = 10 \sin(2\pi 500kt) - 5 \cos[2\pi 515kt] + 5 \cos[2\pi 485kt]$$

3-12. ¿Qué efecto tiene la modulación sobre la amplitud del componente de la portadora del espectro de la señal modulada?

3-13. Describa la importancia de la siguiente fórmula:

$$P_t = P_c + \frac{m^2 P_c}{2}$$

3-14. ¿Qué significa AM DSBFC?

3-15. Describa la relación entre la portadora y la potencia de la banda lateral en una onda AM DSBFC.

3-16. ¿Cuál es la desventaja que predomina en la transmisión de doble banda lateral de portadora completa AM?

3-17. ¿Cuál es la ventaja que predomina en la transmisión de **doble banda lateral con portadora** completa de AM?

3-18. ¿Cuál es la máxima relación de la potencia de la banda lateral a la potencia transmitida total que puede lograrse con AM DSBFC?

3-19. ¿Porqué cualquiera de los amplificadores que siguen al modulador en un sistema de AM DSBFC tiene que ser lineal?

3-20. ¿Cuál es la desventaja principal de un modulador de transistor de clase A de baja potencia?

3-21. Describa la diferencia entre un modulador de nivel bajo y alto.

3-22. Mencione las ventajas de la modulación de bajo nivel; modulación de alto nivel. 3-23. ¿Cuál es la ventaja de usar un patrón trapezoidal para evaluar una envolvente de AM?

PROBLEMAS

3-1. Si una onda modulada de 20 V cambia en amplitud ± 5 V, determine el coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.

3-2. Para un voltaje de envolvente máximo positivo de 12 V y una amplitud de envolvente mínima positiva de 4 V, determine el coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.

3-3. Para una envolvente con $+V_{max} = 40$ V y $+V_{min} = 10$ V, determine:

- Amplitud de la portadora no modulada.
- Cambio pico en amplitud de la onda modulada.
- Coefficiente de modulación y porcentaje de modulación.

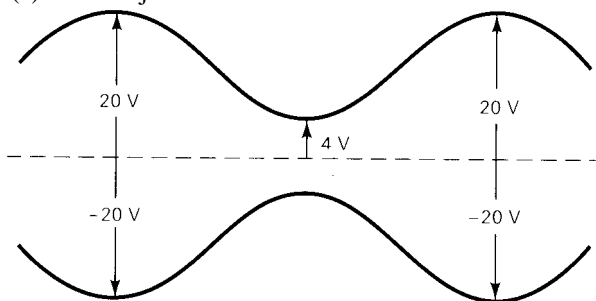
3-4. Para una amplitud de la portadora no modulada de 16 V y un coeficiente de modulación $m = 0.4$, determine las amplitudes de la portadora modulada y frecuencias laterales.

3-5. Trace la envolvente para el problema 3-4 (señale todos los voltajes pertinentes)

3-6. Para la envolvente de AM mostrada a continuación, determine:

- Amplitud pico de las frecuencias laterales superior e inferior.

- (b) Amplitud pico de la portadora.
- (c) Cambio pico en la amplitud de la envolvente.
- (d) Coeficiente de modulación.
- (e) Porcentaje de modulación.



- 3-7. Una entrada a un modulador de AM DSBFC es una portadora de 800 kHz con una amplitud de 40 V. La segunda entrada es una señal modulante de 25 kHz, cuya amplitud es suficiente para producir un cambio de ± 10 V en la amplitud de la envolvente. Determine:
- (a) Frecuencias laterales superior e inferior.
 - (b) Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.
 - (c) Amplitudes pico positivas máxima y mínima de la envolvente.
 - (d) Dibuje el espectro de salida.
 - (e) Trace la envolvente (señale todos los voltajes pertinentes)

- 3-8. Para un coeficiente de modulación $m = 0.2$ y una potencia de la portadora $P_c = 1000$ W, determine:

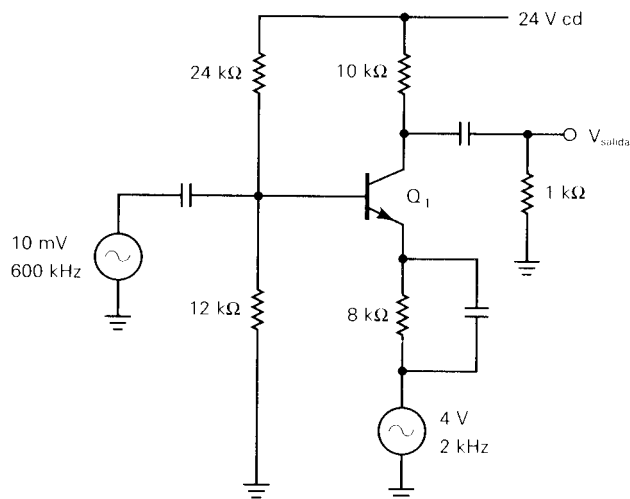
- (a) Potencia de la banda lateral.
- (b) Potencia total transmitida.

- 3-9. Para una onda AM DSBFC con un voltaje de la portadora no modulada de 25 V y una resistencia de carga de 50 ohm determine:

- (a) Potencia de la portadora no modulada.
- (b) Potencia de la portadora modulada y las frecuencias laterales superior e inferior para un coeficiente de modulación $m = 0,6$.

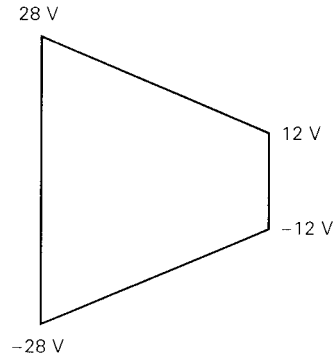
- 3-10. Determine las ganancias de voltaje de reposo (o de operación), máximo y mínimo para el modulador de emisor mostrado a continuación con la amplitud de la portadora y amplitud de la señal modulante.

- 3-11. Trace la envolvente de salida y dibuje el espectro de frecuencia de salida para el circuito mostrado en el problema 3-10.



- 3-12. Para un modulador de transistor de baja potencia con una coeficiente de modulación $m = 0.4$, una ganancia de operación $A_q = 80$ y una amplitud de portadora de entrada de 0.002 V , determine:
- (a) Las ganancias de voltaje máximo y mínimo.
 - (b) Los voltajes máximos y mínimos para V_{salida}
 - (c) Trace la envolvente.

- 3-13. Para el patrón trapezoidal mostrado a continuación, determine:
- (a) Coeficiente de modulación.
 - (b) Porcentaje de modulación.
 - (c) Amplitud de la portadora.
 - (d) Amplitudes de las frecuencias laterales superior e inferior.



- 3-14. Para un modulador AM con una frecuencia portadora de $f_c = 200 \text{ kHz}$ y una frecuencia máxima de la señal modulante $f_m = 10 \text{ kHz}$ determine:
- (a) Límites de la frecuencia para las bandas laterales superior e inferior.
 - (b) Frecuencias laterales superior e inferior producidas cuando la señal modulante es un tono de 7 kHz .
 - (c) Ancho de banda para la frecuencia máxima de la señal modulante. (d) Dibuje el espectro de salida.