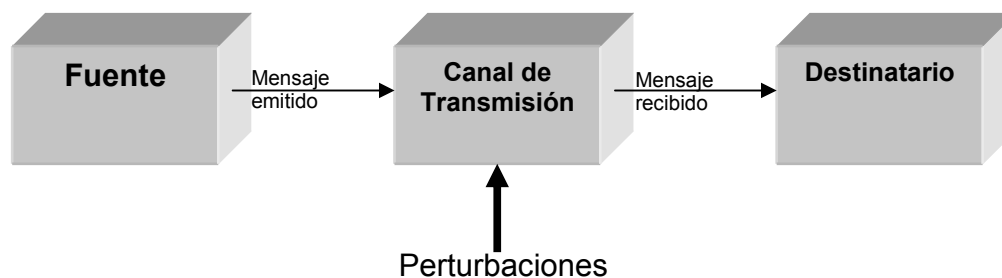


Cap. 3.1. TRANSMISIÓN DE MODULACIÓN DE AMPLITUD

INTRODUCCION

Las señales de información deben ser transportadas entre un transmisor y un receptor sobre alguna forma de medio de transmisión. Sin embargo, las señales de información pocas veces encuentran una forma adecuada para la transmisión. La *modulación* se define como **el proceso de transformar información de su forma original a una forma más adecuada para la transmisión**. *Demodulación* es el proceso inverso (es decir, la onda modulada se convierte nuevamente a su forma original). La modulación se realiza en el transmisor en un circuito llamado *modulador*, y la demodulación se realiza en el receptor en un circuito llamado *demodulador o detector*. El propósito de este texto es introducir al lector a los conceptos fundamentales de la transmisión AM, describir algunos de los circuitos usados en los moduladores AM y describir dos tipos diferentes de transmisores AM.

Supongamos que disponemos de cierta información, analógica o digital, que deseamos enviar por un canal de transmisión. Este último designa al soporte, físico o no, que se utilizará para transportar la información desde la fuente hacia el destinatario. La figura 2.1 resume el enunciado del problema que se acaba de plantear. La información procedente de la fuente puede ser analógica o digital. Por ejemplo, puede tratarse de una señal de audio analógica, de una señal de vídeo, también analógica, o de estas mismas señales digitalizadas.



En este caso, son secuencias de caracteres discretos, extraídos de un alfabeto finito de n caracteres, por tanto, puede tratarse de una sucesión de *ceros y unos*, por ejemplo. Hablaremos únicamente de las señales analógicas.

DEFINICIÓN DE LOS TÉRMINOS

Banda base

Se habla de señal en banda base cuando se designan los mensajes emitidos. La banda ocupada se encuentra comprendida entre la frecuencia 0, o un valor muy cercano a éste, y una frecuencia máxima f_{max} .

Ancho de banda de la señal

El ancho de banda de la señal en banda base es la extensión de las frecuencias sobre las que la señal tiene una potencia superior a cierto límite. Generalmente, este límite f_{max} se fija a -3 dB , que corresponde a la mitad de la potencia máxima. El ancho de banda se expresa en Hz , kHz o MHz .

Espectro de una señal

Se habla de espectro de una señal para designar la distribución en frecuencia de su potencia. Se habla también de densidad espectral de potencia, DSP, que es el cuadrado del módulo de la transformada de Fourier de esta señal.

Banda de paso del canal

El canal de transmisión puede ser, por ejemplo, *una línea bifilar trenzada, un cable coaxial, una guía de ondas, una fibra óptica o, simplemente, el aire*. Es evidente que ninguno de estos soportes está caracterizado con la misma banda de paso. La banda de paso del canal no debe confundirse con la distribución espectral de la señal en banda base.

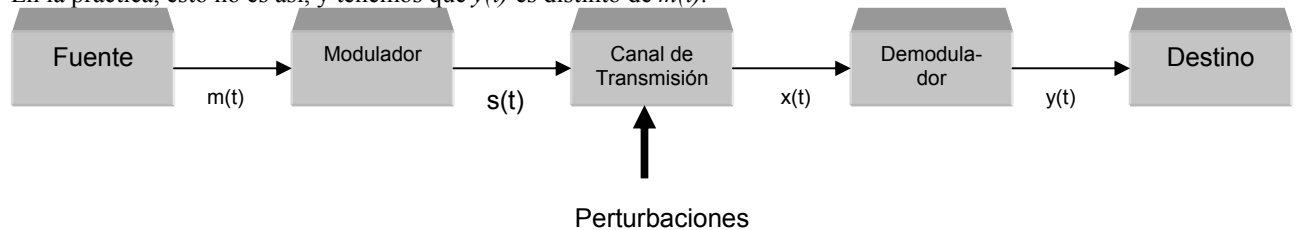
FINALIDAD DE LA MODULACIÓN

El objetivo de la modulación es el de adaptar la señal que se va a transmitir al canal de comunicaciones que hay entre la fuente y el destinatario. Se introducen, por tanto, dos operaciones suplementarias a la de la figura anterior; entre la fuente y el canal, una primera operación llamada modulación, y entre el canal y el destinatario, una segunda denominada desmodulación. La cadena de transmisión global queda entonces como se representa en la figura siguiente.

El objetivo de la transmisión es el de hacer llegar el mensaje emitido $m(t)$ al destinatario.

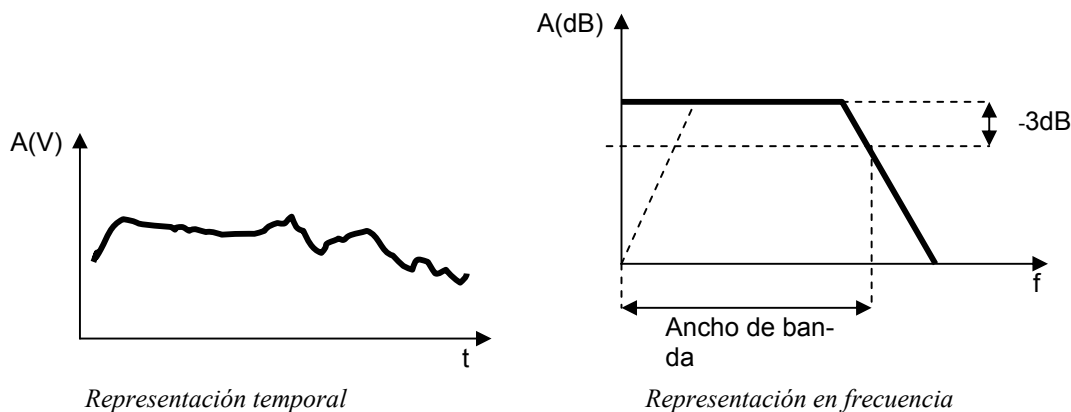
En el caso ideal, se tiene: $y(t) = m(t)$.

En la práctica, esto no es así, y tenemos que $y(t)$ es distinto de $m(t)$.



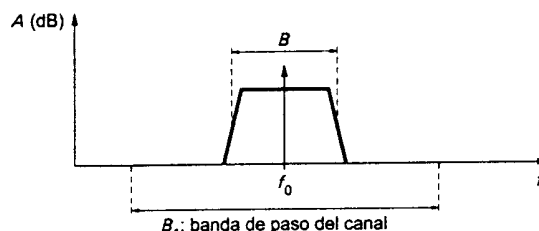
La diferencia reside principalmente en la presencia de ruido debido a las perturbaciones que afectan al canal de transmisión y en las imperfecciones de los procesos de modulación y desmodulación.

La señal $m(t)$ es la señal en banda base que se va a transmitir. Puede ser representada tanto en forma temporal como en forma de espectro de frecuencias. Estas dos formas se han dibujado juntas debajo. La modulación recurre a una nueva señal auxiliar de frecuencia f_0 . Esta frecuencia f_0 recibe el nombre de frecuencia portadora o frecuencia central. Evidentemente, la frecuencia f_0 se elige de forma que se encuentre en la banda de paso del canal de transmisión B_c .



La señal que será transmitida, $s(t)$, es la señal llamada portadora a la frecuencia f_0 , modulada por el mensaje $m(t)$.

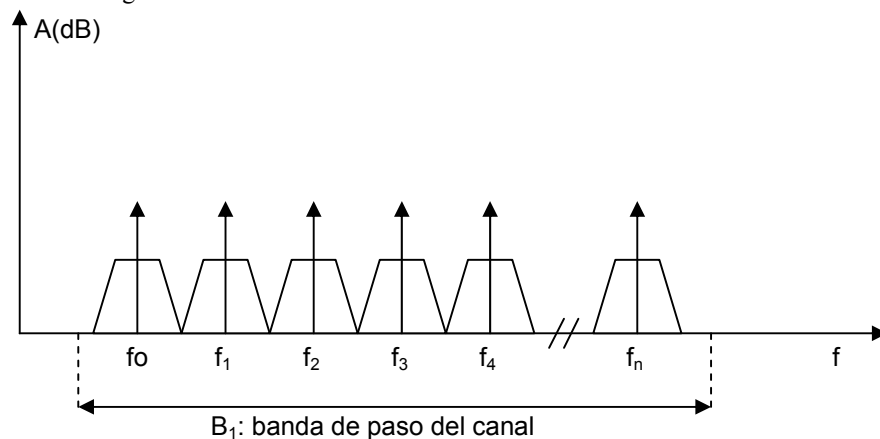
La señal $s(t)$ ocupa una banda B en torno a la frecuencia f_0 , como se ve en la figura. Este ancho B es un parámetro importante y está en función del tipo de modulación. En muchos casos, lo que se persigue es reducir B para albergar en la banda de frecuencias B_c el máximo de información. Por ello, se realiza una multiplexación de frecuencias de forma que se puedan transmitir simultáneamente sobre el mismo medio el mayor número de mensajes.



La representación espectral de las señales transportadas en el canal de transmisión quedaría entonces como se muestra en la figura siguiente. En el sentido general del término, la modulación es una operación que consiste en transmitir una señal moduladora por medio de una señal llamada portadora $v(t)$.

$$v(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$

La modulación consiste en efectuar un cambio o variación en alguno de los parámetros de $v(t)$. La actuación sobre A se traduce en una *modulación de amplitud*; si se actúa sobre ω se modula la *frecuencia*, mientras que si se actúa sobre ϕ la modulación es de *fase*. Estos tres tipos de modulación se pueden aplicar tanto si la señal moduladora $m(t)$ es analógica como si es digital.



MODULACION DE AMPLITUD

Modulación de amplitud (AM) es el proceso de cambiar la amplitud de una portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud de la señal modulante (información). Las frecuencias que son lo suficientemente altas para radiarse de manera eficiente por una antena y propagarse por el espacio libre se llaman comúnmente *radiofrecuencias* o simplemente RF. Con la modulación de amplitud, la información se imprime sobre la portadora en la forma de cambios de amplitud. La modulación de amplitud es una forma de modulación relativamente barata y de baja calidad de transmisión, que se utiliza en la radiodifusión de señales de audio y vídeo. La banda de radiodifusión comercial AM abarca desde 535 a 1605 kHz. La radiodifusión comercial de televisión se divide en tres bandas (dos de VHF y una de UHF). Los canales de la banda baja de VHF son entre 2 y 6 (54 a 88 MHz), los canales de banda alta de VHF son entre 7 y 13 (174 a 216 MHz) y los canales de UHF son entre 14 a 83 (470 a 890 MHz). La modulación de amplitud también se usa para las comunicaciones de radio móvil de dos sentidos tal como una radio de banda civil (CB) (26.965 a 27.405 MHz) o los aviones con los aeropuertos (118 a 136 Mhz).

Un modulador de AM es un aparato no lineal con dos señales de entrada: a) una señal portadora de amplitud constante y de frecuencia única y b) la señal de información. La información “actúa sobre” o “modula” la portadora y puede ser una forma de onda de frecuencia simple o compleja compuesta de muchas frecuencias que fueron originadas de una o más fuentes. Debido a que la información actúa sobre la portadora, se le llama señal modulante. La resultante se llama onda modulada o señal modulada.

La envolvente de AM

Son posibles de generar varias formas o variaciones de modulación de amplitud. Aunque matemáticamente no es la forma más sencilla, la portadora de AM de doble banda lateral (AM DSBFC) se discutirá primero, puesto que probablemente sea la forma más utilizada de la modulación de amplitud. AM DSBFC se le llama algunas veces como AM convencional. (Double Side Band Frequency Carrier)

La figura 3-1a muestra un modulador AM DSBFC simplificado que ilustra la relación entre la portadora $[V_c \sin(2\pi f_c t)]$ la señal de entrada (modulante) de la información $[V_m \sin(2\pi f_m t)]$, y la onda modulada $[V_{am}(t)]$. La figura 3-1b muestra en el dominio de tiempo como se produce una onda AM a partir de una señal modulante de frecuencia simple. La onda modulada de salida contiene todas las frecuencias que componen la señal AM y se utilizan para llevar la información a través del sistema. Por lo tanto, a la forma de la onda modulada se le llama la *envolvente*. Sin señal modulante, la onda de salida simplemente es la señal portadora amplificada. Cuando se aplica una señal modulante, la am-

plitud de la onda de salida varía de acuerdo a la señal modulante. Obsérvese que la forma de la envolvente de AM es idéntica a la forma de la señal modulante. Además, el tiempo de un ciclo de la envolvente es el mismo que el periodo de la señal modulante. Consecuentemente, la relación de repetición de la envolvente es igual a la frecuencia de la señal modulante.

Espectro de frecuencia de AM y ancho de banda

Como se estableció anteriormente, un modulador AM es un dispositivo no lineal. Por lo tanto, ocurre una mezcla no lineal y la envolvente de salida es una onda compleja compuesta por un voltaje de c.c., la frecuencia portadora y las frecuencias de suma ($f_c + f_m$) y diferencia ($f_c - f_m$) (es decir, los productos cruzados). La suma y la diferencia de frecuencias son desplazadas de la frecuencia portadora por una cantidad igual a la frecuencia de la señal modulante. Por lo tanto, una envolvente de AM contiene componentes en frecuencia espaciados por " f_m " Hz en cualquiera de los lados de la portadora. Sin embargo, debe observarse que la onda modulada no contiene una componente de frecuencia que sea igual a la frecuencia de la señal modulante. El efecto de la modulación es trasladar la señal de modulante en el dominio de la frecuencia para reflejarse simétricamente alrededor la frecuencia de la portadora.

La figura 3-2 muestra el espectro de frecuencia para una onda de AM. El espectro de AM abarca desde ($f_c - f_{m(max)}$) a ($f_c + f_{m(max)}$) en donde f_c es la frecuencia de la portadora y $f_{m(max)}$ es la frecuencia de la señal modulante más alta. La banda de frecuencias entre $f_c - f_{m(max)}$ y f_c se llama *banda lateral inferior (LSB)* y cualquier frecuencia dentro de esta banda se llama *frecuencia lateral inferior (LSF)*. La banda de frecuencias entre f_c y $f_c + f_{m(max)}$ se llama *banda lateral superior (USB)* y cualquier frecuencia dentro de esta banda se llama *frecuencia lateral superior (USF)*. Por lo tanto, el ancho de banda (B ó BW) de una onda AM DSBFC es igual a la diferencia entre la frecuencia lateral superior más alta y la frecuencia lateral inferior más baja o sea dos veces la frecuencia de la señal modulante más alta (es decir, $B = 2f_{m(max)}$). Para la propagación de una onda radio, la portadora y todas las frecuencias dentro de las bandas laterales superiores e inferiores debe ser lo suficientemente altas para propagarse por la atmósfera de la Tierra (incluida la ionosfera).

EJEMPLO 3-1

Para un modulador de AM DSBFC con una frecuencia portadora $f_c = 100$ kHz y una frecuencia máxima de la señal modulante $f_{m(max)} = 5$ kHz, determine:

- Limites de frecuencia para las bandas laterales superior e inferior.
- Ancho de banda.
- Frecuencias laterales superior e inferior producidas cuando la señal modulante es un tono de 3 kHz de frecuencia simple.
- Dibuje el espectro de la frecuencia de salida.

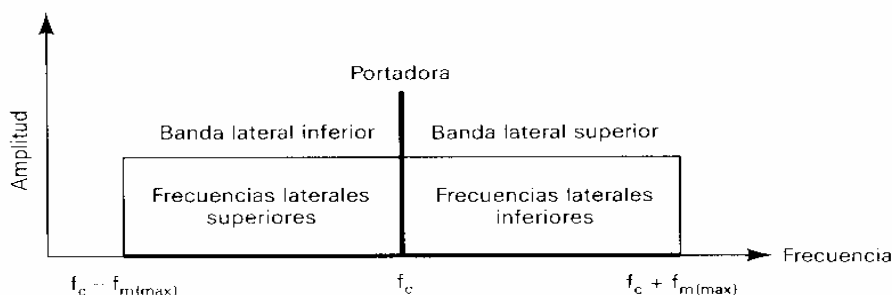


Figura 3-2 Espectro de frecuencia de una onda AM DSBFC.

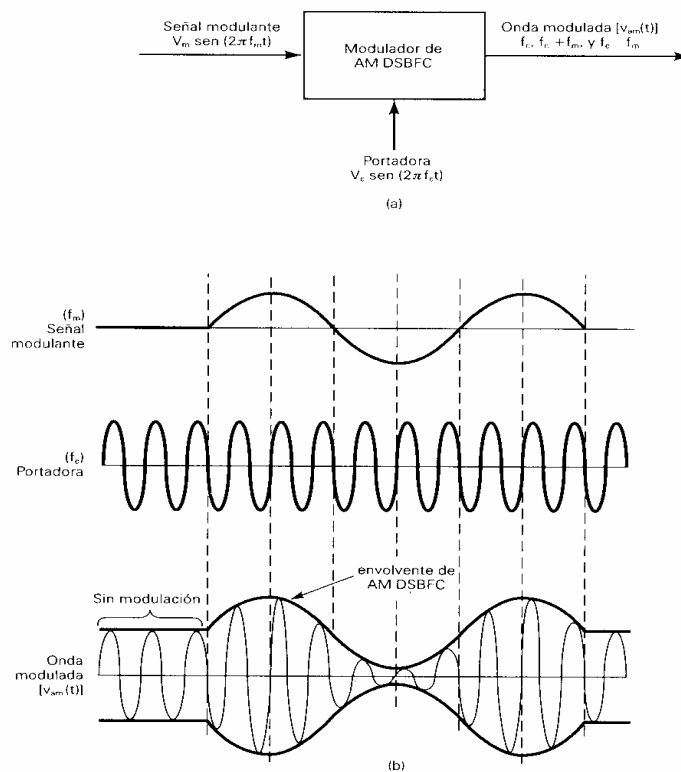


Figura 3-1 Generación de AM: (a) modulador de AM DSBFC; (b) produciendo una envolvente de AM DSBFC —en el dominio de tiempo.

Solución

(a) La banda lateral inferior se extiende desde la frecuencia lateral inferior más baja posible a la frecuencia portadora o

$$LSB = [f_c - f_{m(max)}] \text{ a } f_c \Rightarrow (100 - 5) \text{ kHz a } 100 \text{ kHz} \Rightarrow 95 \text{ a } 100 \text{ kHz}$$

La banda lateral superior se extiende desde la frecuencia portadora a la frecuencia lateral superior más alta posible o

$$USB = f_c \text{ a } [f_c + f_{m(max)}] \Rightarrow 100 \text{ kHz a } (100 + 5) \text{ kHz} \Rightarrow 100 \text{ a } 105 \text{ kHz}$$

(b) El ancho de banda es igual a la diferencia entre la máxima frecuencia lateral superior y la mínima frecuencia lateral inferior o

$$B = 2f_{m(max)} = 2 \times (5 \text{ kHz}) = 10 \text{ kHz}$$

(c) La frecuencia lateral superior es la suma de la portadora y la frecuencia modulante o

$$f_{usf} = f_c + f_m = 100 \text{ kHz} + 3 \text{ kHz} = 103 \text{ kHz}$$

La frecuencia lateral inferior es la diferencia entre la portadora y la frecuencia modulante

$$F_{lsf} = f_c - f_m = 100 \text{ kHz} - 3 \text{ kHz} = 97 \text{ kHz}$$

(d) El espectro de frecuencia de salida se muestra en la figura 3-3.

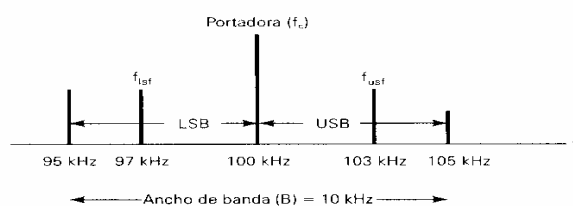
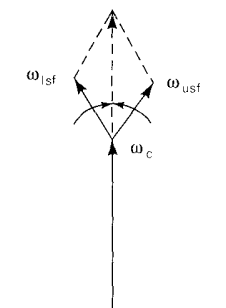


Figura 3-3 Espectro de salida para el ejemplo 3-1.

Representación fasorial de una onda modulada en amplitud

Para una señal modulante de frecuencia única, se produce una envolvente de AM a partir del vector suma de la portadora y de las frecuencias laterales superiores e inferiores. Las dos frecuencias laterales se combinan y producen un componente resultante que a su vez se combina con el vector de la portadora. La figura 3-4a muestra esta adición fasorial. Los fasores para la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores giran en una dirección contraria a las manecillas del reloj. Sin embargo, la frecuencia lateral superior gira más rápido que la portadora ($\omega_{usf} > \omega_c$) y la frecuencia lateral inferior gira más lenta ($\omega_{isf} < \omega_c$). Consecuentemente, si el fasor para la portadora se mantiene estacionario, el fasor para la frecuencia lateral superior continuará girando en una dirección contraria a las manecillas del reloj respecto a la portadora, y el fasor para la frecuencia lateral inferior girará en la dirección de las manecillas del reloj. Los fasores para la portadora y las frecuencias superiores e inferiores combinan, a veces en fase (adición) y a veces fuera de fase (sustracción). Para la forma de onda mostrada en la figura 3-4b, la máxima amplitud positiva de la envolvente ocurre cuando la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores están en sus máximos valores **positivos** al mismo tiempo ($+V_{max} = V_c + V_{usf} + V_{isf}$). La mínima amplitud positiva de la envolvente ocurre cuando la portadora está en su máximo valor **positivo** al mismo tiempo que las frecuencias laterales superiores e inferiores están en sus máximos valores **negativos** ($+V_{min} = V_c - V_{usf} - V_{isf}$). La máxima amplitud **negativa** ocurre cuando la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores están en sus máximos valores **negativos** al mismo tiempo ($-V_{max} = -V_c - V_{usf} - V_{isf}$).

Adición fasorial



V_{usf} = voltaje de la frecuencia lateral superior
 V_{isf} = voltaje de la frecuencia lateral inferior

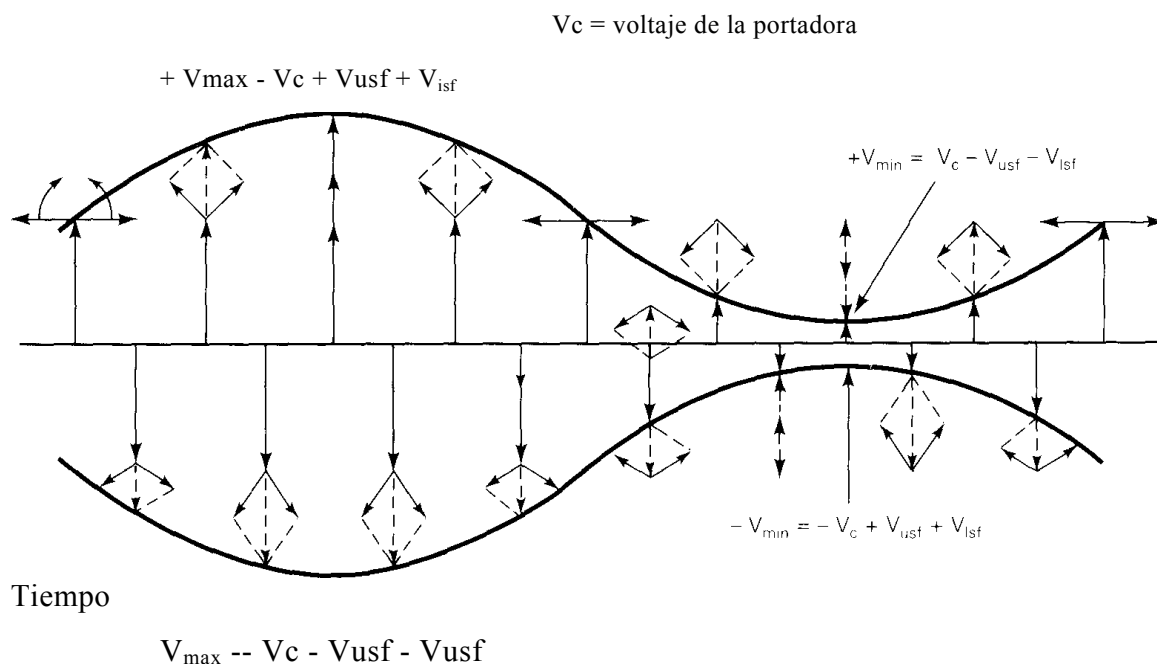


Figura 3-4 La adición fasorial en una envolvente de AM DSBFC:

(a) adición fasorial de la portadora y las frecuencias laterales superior e inferior; (b) adición fasorial produciendo una envolvente de AM.

La mínima amplitud **negativa** ocurre cuando la portadora está en su máximo valor **negativo** al mismo tiempo que las frecuencias laterales negativas y positivas están en sus máximos valores **positivos** ($-V_{\min} = -V_c + V_{usf} + V_{lsf}$).

Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación

Coeficiente de modulación es un término utilizado para describir la cantidad de cambio de amplitud (modulación) presente en una forma de una onda de AM. *El porcentaje de modulación* es simplemente el coeficiente de modulación establecido como un porcentaje. Más específico, el porcentaje de modulación proporciona el cambio de porcentaje en la amplitud de la onda de salida cuando está actuando sobre la portadora por una señal modulante. Matemáticamente, el coeficiente de modulación es

$$m = \frac{E_m}{E_c} \quad (3-1)$$

en donde

m = coeficiente de modulación (sin unidad)

E_m = cambio pico en la amplitud del voltaje de la forma de onda de salida (volts)

E_c = amplitud pico del voltaje de la portadora no modulada (volts)

La ecuación 3-1 puede rearrreglarse para resolver a E_m y E_c como

$$E_m = mE_c \quad (3-2)$$

$$E_c = E_m/m \quad (3-3)$$

y el porcentaje de modulación (M) es

$$M = E_m/E_c \times 100 \quad (3-4)$$

Las relaciones entre m , E_m y E_c se muestra en la figura 3-5.

Si la señal modulante es una onda seno pura de frecuencia simple y el proceso de modulación es simétrico (es decir, las excursiones positivas y negativas de la amplitud de la envolvente son iguales), el porcentaje de modulación puede derivarse de la siguiente manera (refiérase a la figura 3-5 para la siguiente derivación):

$$E_m = \frac{1}{2} (V_{\max} - V_{\min}) \quad (3-5)$$

$$E_c = \frac{1}{2} (V_{\max} + V_{\min}) \quad (3-6)$$

Por lo tanto

$$M = \frac{\frac{1}{2} (V_{\max} - V_{\min})}{\frac{1}{2} (V_{\max} + V_{\min})} \times 100$$

$$M = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{(V_{\max} + V_{\min})} \times 100 \quad (3-7)$$

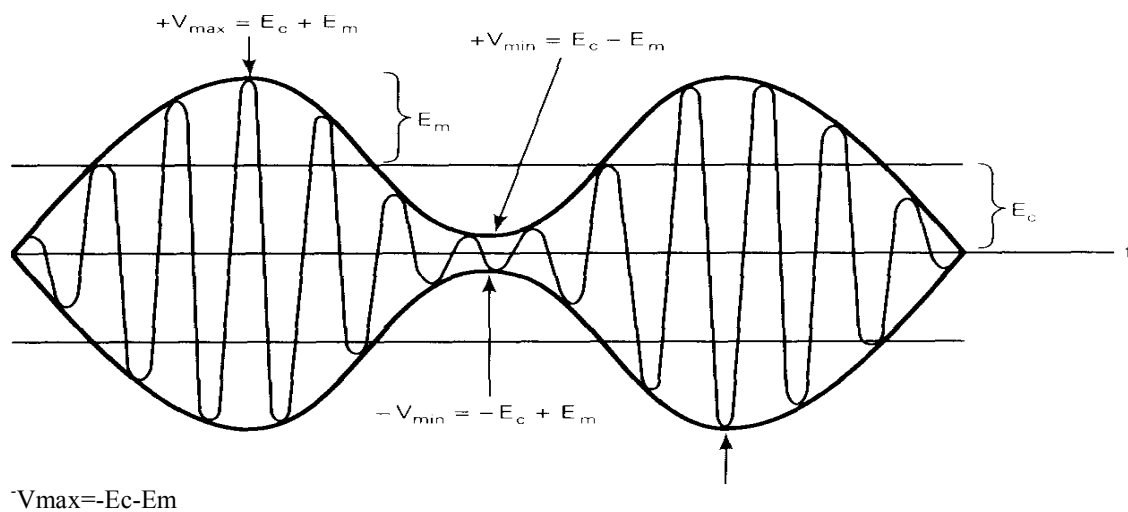


Figura 3-5 Coeficiente de modulación, E_m y E_c

en donde $V_{\max} = E_c + E_m$ y $V_{\min} = E_c - E_m$

El cambio pico en la amplitud de la onda de salida (E_m) es la suma de los voltajes de las frecuencias laterales superiores e inferiores. Por lo tanto, ya que $E_m = E_{usf} + E_{isf}$ y $E_{usf} = E_{isf}$ entonces

$$E_{usf} = E_{isf} = \frac{E_m}{2} = \frac{\frac{1}{2}(V_{max} - V_{min})}{2} = \frac{1}{4}(V_{max} - V_{min}) \quad (3-8)$$

en donde E_{usf} = amplitud pico de la frecuencia lateral superior (volts)
 E_{isf} = amplitud pico de la frecuencia lateral inferior (volts)

De la ecuación 3-1 puede observarse que el porcentaje de modulación llega a 100% cuando $E_m = E_c$. Esta condición se muestra en la figura 3-6d. También puede observarse que en una modulación al 100%, la mínima amplitud de la envolvente es $V_{min} = 0$ V. La figura 3-6c muestra una envolvente modulada al 50%; el cambio pico en la amplitud de la envolvente es igual a la mitad de la amplitud de la onda no modulada. El porcentaje máximo que puede imponerse sin provocar una distorsión excesiva es del 100%. A veces el porcentaje de modulación se expresa como el cambio pico en el voltaje de la onda modulada con respecto a la amplitud pico de la portadora no modulada (es decir, porcentaje de cambio = $\Delta E_c / E_c \times 100$)

EJEMPLO 3-2

Para la forma de onda de AM mostrada en la figura 3-7, determine:

- Amplitud pico de las frecuencias laterales superior e inferior.
- Amplitud pico de la portadora no modulada.
- Cambio pico en la amplitud de la envolvente.
- Coeficiente de modulación.
- Porcentaje de modulación.

Solución:

- | | |
|-----------------------|--|
| a) De la ecuación 3-8 | $E_{usf} = E_{isf} = \frac{1}{4}(18 - 2) = 4V$ |
| b) De la ecuación 3-6 | $E_c = \frac{1}{2}(18 + 2) = 10V$ |
| c) De la ecuación 3-5 | $E_m = \frac{1}{2}(18 - 2) = 8V$ |
| d) De la ecuación 3-1 | $m = 8/10 = 0,8$ |
| e) De la ecuación 3-4 | $M = 0,8 \times 100 = 80\%$ |
| y de la ecuación 3-7 | $M = [(18-2)/(18+2)] \times 100 = 80\%$ |

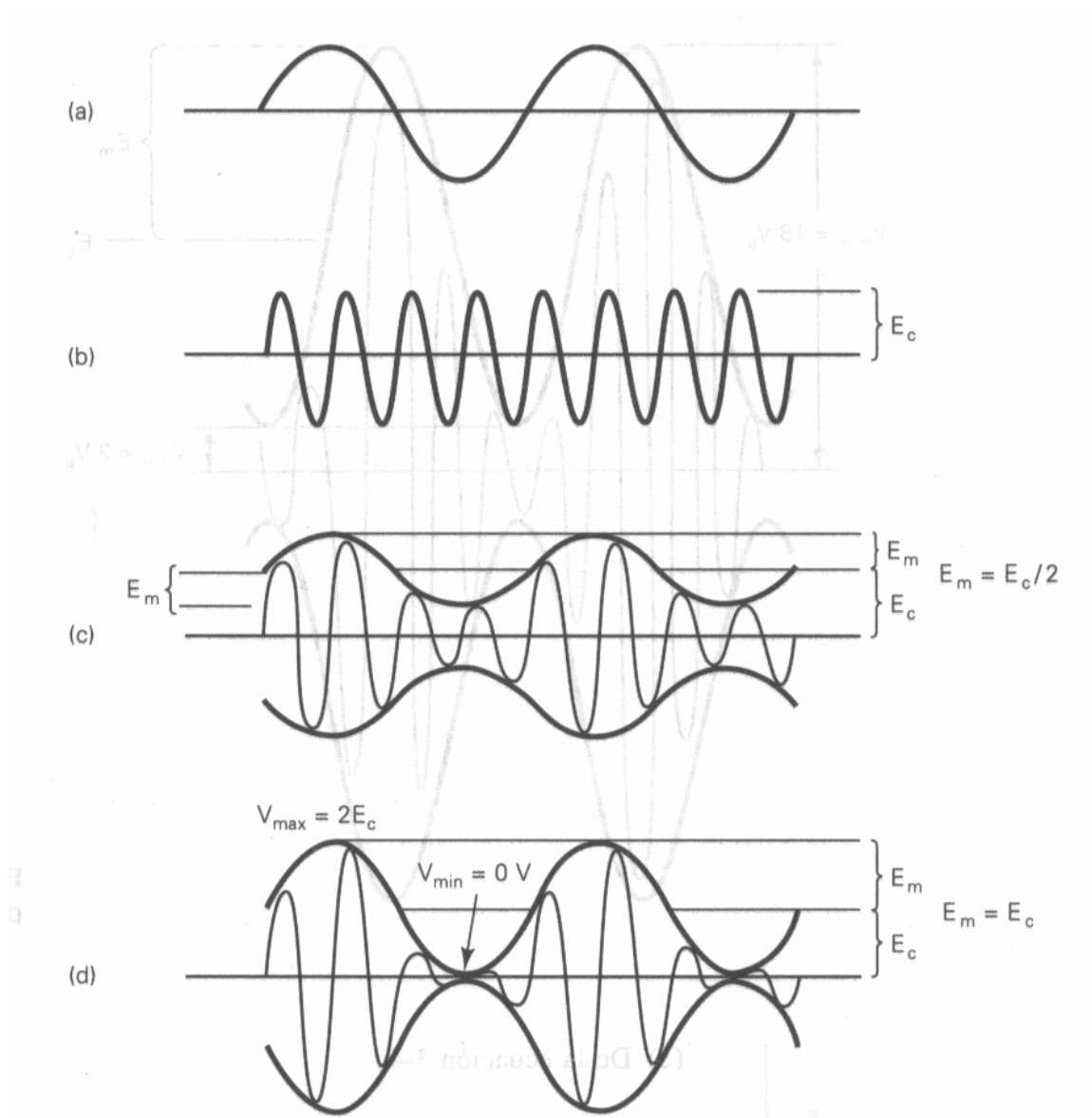


Figura 3-6 Porcentaje de modulación de una envolvente de AM DSBFC (a) señal modulante; (b) portadora no modulada; (c) onda modulada 50%; (d) onda modulada 100%.

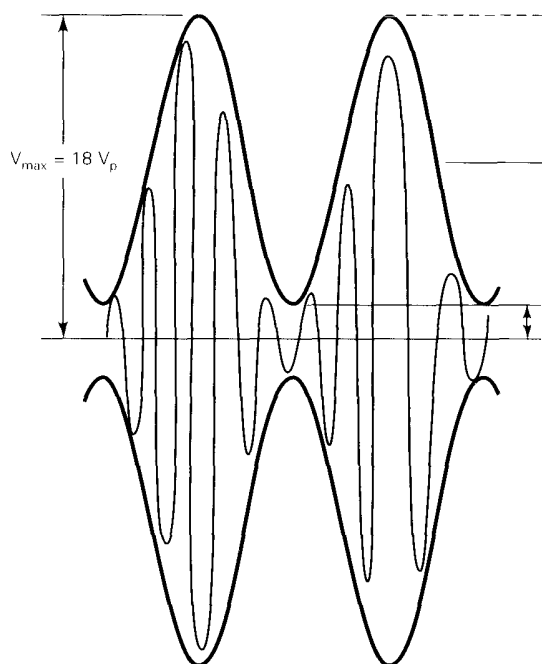


Figura 3-7 Envolvente de AM para el Ejemplo 3-2.

Distribución de voltaje AM

Una portadora no modulada puede describirse matemáticamente como

$$V_c(t) = E_c \sin(2\pi f_c t)$$

en donde $V_c(t)$ = forma de onda de voltaje de tiempo variante para la portadora

E = amplitud pico de la portadora (volts)

f_c = frecuencia de la portadora (hertz)

En la sección anterior fue señalado que la relación de repetición de una envolvente de AM es igual a la frecuencia de la señal modulante, la amplitud de la onda AM varía proporcionalmente a la amplitud de la señal modulante y la máxima amplitud de la onda modulada es igual a $E_c + E_m$. Por lo tanto, la amplitud instantánea de la onda modulada puede expresarse como

$$V_{am}(t) = [E_c + E_m \sin(2\pi f_m t)] [\sin(2\pi f_c t)] \quad (3-9a)$$

en donde $[E_c + E_m \sin(2\pi f_m t)]$ = amplitud de la onda modulada

E_m = amplitud pico en la amplitud de la envolvente (volts)

f_m = frecuencia de la señal modulante (hertz)

Si se sustituye E_m por mE_c

$$V_{am}(t) = [(E_c + mE_c \sin(2\pi f_m t)) [\sin(2\pi f_c t)]] \quad (3-9b)$$

en donde $[E_c + mE_c \sin(2\pi f_m t)]$ = amplitud de la onda modulada.

Factorizando E_c de la ecuación 3-9b y arreglando resulta en

$$V_{am}(t) = [1 + m \sin(2\pi f_m t)] [E_c \sin(2\pi f_c t)] \quad (3-9c)$$

En la ecuación 3-9c, puede observarse que la señal modulante contiene un componente constante (1) y un componente sinusoidal en la frecuencia de la señal modulante [$m \sin(2\pi f_m t)$]. El siguiente análisis muestra cómo la componente constante produce la componente de la portadora en la onda modulada y la componente sinusoidal produce las frecuencias laterales. Multiplicando la ecuación 3-9b o c produce

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

La identidad trigonométrica para el producto de dos senos con diferentes frecuencias es

$$(\sin A)(\sin B) = -\frac{1}{2} \cos(A + B) + \frac{1}{2} \cos(A - B)$$

Por lo tanto,

$$V_{am}(t) = E_c \sin(2\pi f_c t) - \frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] \quad (3-10)$$

Donde el primer término es la portadora propiamente dicha, el segundo término es la frecuencia lateral superior y el tercero es la frecuencia lateral inferior.

Varias características interesantes sobre la modulación de amplitud de la doble banda lateral con portadora completa pueden señalarse a partir de la ecuación 3-10. Primero, observe que la amplitud de la portadora después de la modulación es igual a como era antes de la modulación (E_c). Por lo tanto, **la amplitud de la portadora no está afectada por el proceso de modulación**. Segundo, la amplitud de las frecuencias laterales superiores e inferiores depende de la amplitud de la portadora y del coeficiente de modulación. Para una modulación al **100%**, $m = 1$ y las amplitudes de las frecuencias laterales superiores e inferiores es cada una igual a la mitad de la amplitud de la portadora ($E_c/2$). Por lo tanto, para una modulación de 100%

$$V_{(max)} = E_c + \frac{E_c}{2} + \frac{E_c}{2} = 2E_c$$

$$V_{(min)} = E_c - \frac{E_c}{2} - \frac{E_c}{2} = 0V$$

De las relaciones mostradas anteriormente y usando la ecuación 3-10, es evidente que, mientras la modulación no exceda al 100%, la máxima amplitud pico de una envolvente de

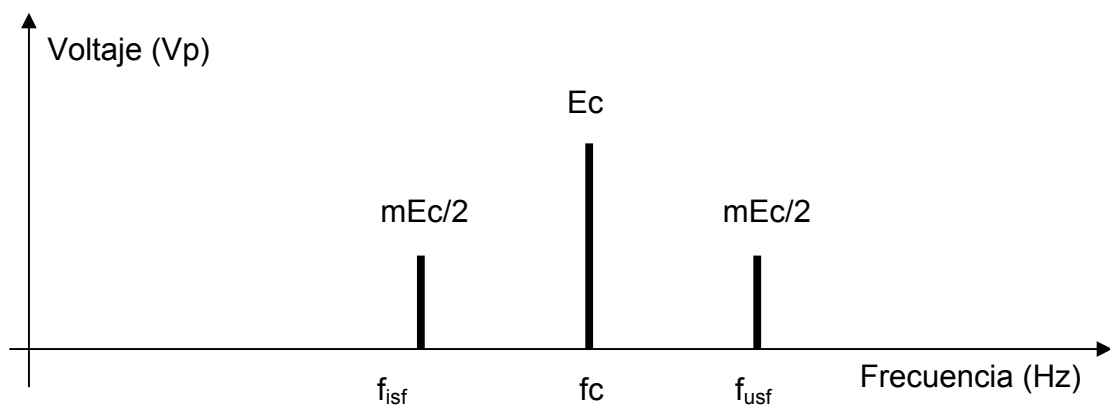


Figura 3-8 Espectro de voltaje para una onda AM DSBFC

AM es $V(\max) = 2E_c$ y la mínima amplitud pico de una envolvente de AM es $V(\min.) = 0 \text{ V}$ Esta relación se muestra en la Figura 3-6d. La Figura 3-8 muestra el espectro de voltaje para una onda AM DSBFC (observe que todos los voltajes se dan en valores pico).

Además, de la ecuación 3-10, la relación de fase relativa entre la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores es evidente. La componente de la portadora es una función seno (+), la frecuencia lateral superior una función coseno (-) y la frecuencia lateral inferior una función coseno (+). Además, la envolvente es una forma de onda repetitiva. Por lo tanto, al comienzo de cada ciclo de la envolvente, la portadora está 90° fuera de fase con las frecuencias laterales superiores e inferiores y las frecuencias laterales superiores e inferiores están 180° fuera de fase entre ellas. Esta relación de fase puede verse en la figura 3-9 para $f_c = 25 \text{ Hz}$ y $f_m = 5 \text{ Hz}$.

EJEMPLO 3-3

Una entrada a un modulador de AM convencional es una portadora de 500 kHz con una amplitud de 20 Vp. La segunda entrada es una señal modulante de 10 kHz de suficiente amplitud para causar un cambio en la onda de salida de $\pm 7.5 \text{ Vp}$. Determine:

- Frecuencias laterales superior e inferior.
- Coefficiente de modulación y porcentaje de modulación.
- Amplitud pico de la portadora modulada y de los voltajes de frecuencia lateral superior e inferior.
- Máxima y mínima amplitudes de la envolvente.
- Expresión de la onda modulada.
- Dibuje el espectro de salida.
- Trace la envolvente de salida.

Solución (a) Las frecuencias laterales superior e inferior son simplemente las frecuencias de suma y diferencia, respectivamente.

$$f_{\text{usf}} = 500 \text{ kHz} + 10 \text{ kHz} = 510 \text{ kHz}$$

$$f_{\text{isf}} = 500 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz} = 490 \text{ kHz}$$

(b) El coeficiente de modulación se determina de la ecuación 3-1:

$$m = 7.5/20 = 0.375$$

El porcentaje de modulación se determina de la ecuación 3-4:

$$M = 100 \times 0.375 = 37.5\%$$

(c) La amplitud pico de la portadora modulada y las frecuencias laterales superior e inferior es

$$E_c(\text{modulada}) = E_c(\text{no modulada}) = 20 \text{ Vp}$$

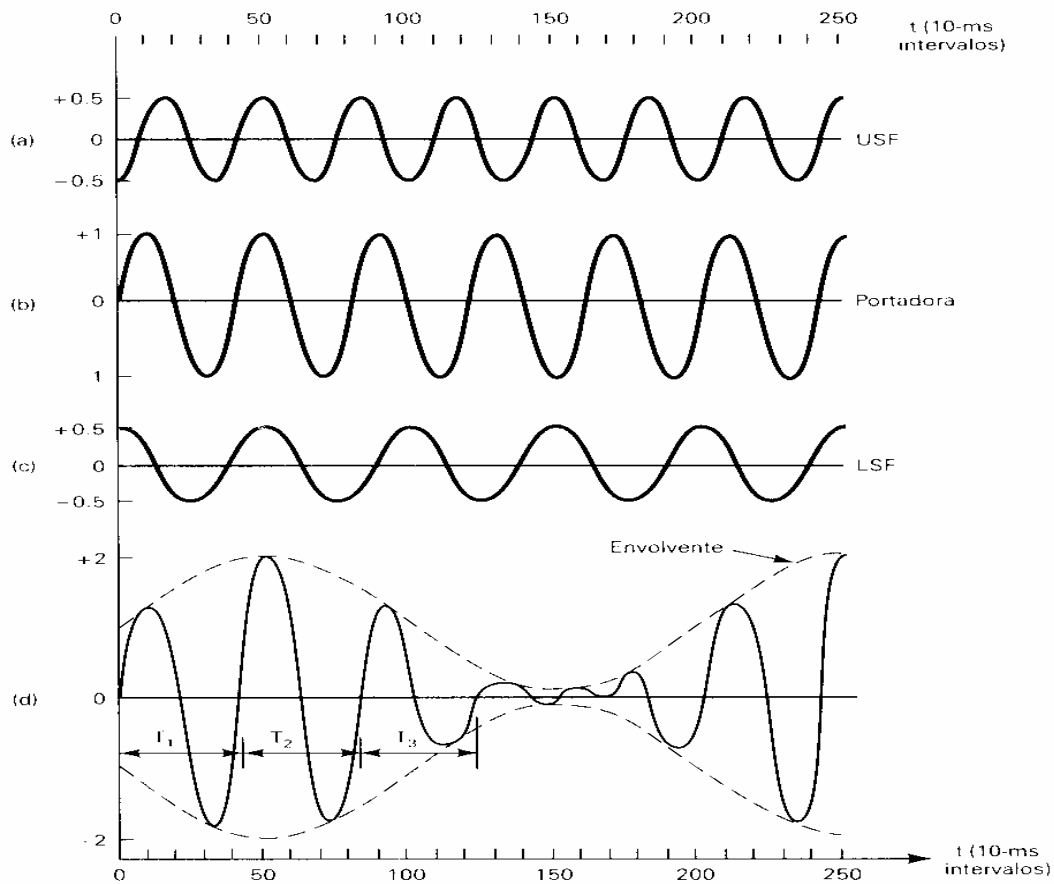


Figura 3-9 Generación de una envolvente de AM DSBFC mostrada en el dominio de tiempo: (a) $-1/2\cos 2\pi 30t$; (b) $\sin 2\pi 25t$; (c) $+1/2\cos 2\pi 20t$; (d) suma de (a), (b) y (c).

$$E_{usf} = E_{isf} = \frac{mE_c}{2} = \frac{(0,375)(20)}{2} = 3,75V_p$$

(d) Las amplitudes máxima y mínima de la envolvente son determinadas de la siguiente manera:

$$V_{(\max)} = E_c + E_m = 20 + 7.5 = 27.5V_p$$

$$V_{(\min)} = E_c - E_m = 20 - 7.5 = 12.5V_p$$

(e) La expresión para la onda modulada sigue el formato de la ecuación 3-10.

$$V_{am}(t) = 20 \sin(2\pi 500kt) - 3.75 \cos(2\pi 510kt) + 3.75 \cos(2\pi 490kt)$$

(f) El espectro de salida se muestra en la figura 3-10.

(g) La envolvente modulada se muestra en la figura 3-11.

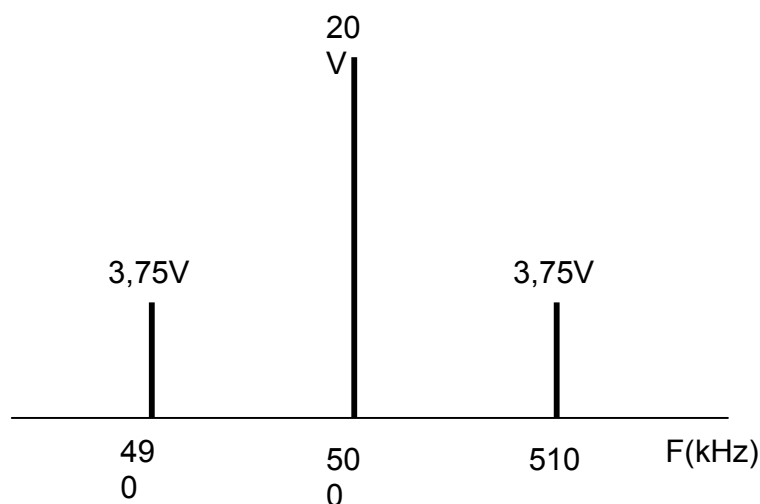


Figura 3-10 Espectro de salida para el ejemplo 3-3

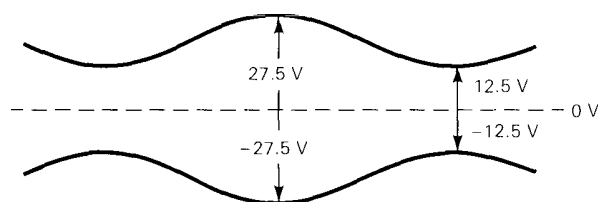


Figura 3-11

Envolvente de AM para el ejemplo 3-3.

Análisis de AM en el dominio de tiempo

La figura 3-9 muestra de qué manera una envolvente AM DSBFC es producida desde la suma algebraica de las formas de onda por la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores. Por simplicidad, se usan las siguientes formas de onda para las señales de entrada modulante y de la portadora:

$$\text{portadora} = V_c(t) = E_c \sin(2\pi 25t)$$

$$\text{señal modulante} = V_m(t) = E_m \sin(2\pi 5t)$$

Al sustituir las ecuaciones 3-11 y 3-12 en la ecuación 3-10, la expresión para la onda modulada es

$$V_{am}(t) = E_c \sin(2\pi 25t) - \frac{mE_c}{2} \cos(2\pi 30t) + \frac{mE_c}{2} \cos(2\pi 20t) \quad (3-13)$$

en donde

$$\begin{aligned} E_c \sin(2\pi 25t) &= \text{portadora (volts)} \\ (-mE_c/2) \cos(2\pi 30t) &= \text{frecuencia lateral superior (volts)} \\ (+mE_c/2) \cos(2\pi 20t) &= \text{frecuencia lateral inferior (volts)} \end{aligned}$$

La tabla 3-1 muestra los valores para los voltajes instantáneos de la portadora, voltajes de las frecuencias laterales superior e inferior y el total de la onda modulada cuando se sustituyen los valores de t , desde 0 a 250 ms, en intervalos de 10 ms, en la ecuación 3-13. Se realiza el voltaje de la portadora no modulada $E_c = 1V_p$ y la modulación al 100%. Las formas de onda correspondientes se muestran en la figura 3-9. Observe que el voltaje máximo de la envolvente es 2V ($2E_c$) y el voltaje mínimo de la envolvente es 0 V.

En la figura 3-9, observe que el tiempo entre cruces de cero similares dentro de la envolvente es constante (es decir, $T_1 = T_2 = T_3$, y así sucesivamente). También observe que las amplitudes de los picos sucesivos dentro de la envol-

vente no son iguales. Esto indica que un ciclo dentro de la envolvente no es una onda seno pura y por lo tanto, la onda modulada debe componerse de más de una frecuencia: la suma de la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores. La figura 3-9 también muestra que la amplitud de la portadora no varía, pero en cambio, la amplitud de la envolvente varía de acuerdo con la señal modulante. Esto se logra con la suma de las frecuencias laterales superiores e inferiores a la forma de onda de la portadora

| TABLA 3-1 VOLTAJES INSTANTÁNEOS | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------|
| USF, -1/2 cos 2π30t | Portadora, sen 2π25t | LSF, +1/2 cos 2π20t | Envolvente V _{am} (t) | Tiempo t (ms) |
| -0.5 | 0 | +0.5 | 0 | 0 |
| +0.155 | +1 | +0.155 | +1.31 | 10 |
| +0.405 | 0 | -0.405 | 0 | 20 |
| -0.405 | -1 | -0.405 | -1.81 | 30 |
| -0.155 | 0 | +0.155 | 0 | 40 |
| +0.5 | +1 | +0.5 | 2 | 50 |
| -0.155 | 0 | +0.155 | 0 | 60 |
| -0.405 | -1 | -0.405 | -1.81 | 70 |
| +0.405 | 0 | -0.405 | 0 | 80 |
| +0.155 | +1 | +0.155 | +1.31 | 90 |
| -0.5 | 0 | +0.5 | 0 | 100 |
| +0.155 | -1 | +0.155 | -0.69 | 110 |
| +0.405 | 0 | -0.405 | 0 | 120 |
| -0.405 | +1 | -0.405 | +0.19 | 130 |
| -0.155 | 0 | +0.155 | 0 | 140 |
| +0.5 | -1 | +0.5 | 0 | 150 |
| -0.155 | 0 | +0.155 | 0 | 160 |
| -0.405 | +1 | -0.405 | +0.19 | 170 |
| +0.405 | 0 | -0.405 | 0 | 180 |
| +0.155 | -1 | +0.155 | -0.69 | 190 |
| | 0 | +0.5 | 0 | 200 |
| +0.155 | +1 | +0.155 | +1.31 | 210 |
| +0.405 | 0 | -0.405 | 0 | 220 |
| -0.405 | -1 | -0.405 | -1.81 | 230 |
| +0.405 | 0 | -0.405 | 0 | 240 |
| +0.155 | +1 | +0.155 | +1.31 | 250 |

Distribución de la potencia de AM

En cualquier circuito eléctrico, la potencia disipada es igual al voltaje rms al cuadrado, dividido por la resistencia (es decir, $P = E^2/R$). Por lo tanto, la potencia desarrollada a través de una carga por una portadora no modulada es igual al voltaje de la portadora al cuadrado, dividido por la resistencia de carga. Matemáticamente, para una onda sinusoidal la potencia de la portadora no modulada se expresa como

$$P_c = \frac{\left(\frac{E_c}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{E_c^2}{2R} \quad (3-14)$$

en donde P_c = potencia de la portadora (watts)

E_c = voltaje pico de la portadora (volts) R = resistencia de carga (ohms)

Las potencias de las bandas laterales superiores e inferiores se expresan matemáticamente como

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{(mE_c/2)^2}{2R} = \frac{m^2 E_c^2}{8R} \quad (3-15)$$

en donde $mE_c/2$ = voltaje pico de las frecuencias laterales superiores e inferiores

P_{usb} = potencia de la banda lateral superior (watts)

P_{isb} = potencia de la banda lateral inferior (watts)

$mE_c/2$ = voltajes picos de las bandas laterales superior e inferior

Sustituyendo la ecuación 3-14 en la ecuación 3-15 produce

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{m^2 P_c}{4} \quad (3-16)$$

Es evidente de la ecuación 3-16 para un coeficiente de modulación $m = 0$ la potencia en las bandas laterales superiores e inferiores es cero y el total de la potencia transmitida es simplemente la potencia de la portadora.

La potencia total en una onda de amplitud modulada es igual a la suma de las potencias de la portadora, la banda lateral superior y la banda lateral inferior. Matemáticamente, la potencia total en una envolvente AM DSBFC es

$$P_t = P_c + P_{usb} + P_{isb} \quad (3-17)$$

en donde P_t = potencia total de la envolvente de AM DSBFC (watts)

P_c = potencia de la portadora (watts)

P_{usb} = potencia de la banda lateral superior (watts)

P_{isb} = potencia de la banda lateral inferior (watts)

Sustituyendo la ecuación 3-16 en la ecuación 3-17 produce

$$P_t = P_c + \frac{m^2 P_c}{4} + \frac{m^2 P_c}{4} \quad (3-18)$$

$$P_t = P_c + \frac{m^2 P_c}{2} \quad (3-19)$$

Del análisis precedente, puede observarse que la potencia de la portadora en la onda modulada es igual a la potencia de la portadora en la onda no modulada. Por lo tanto, es evidente que la potencia de la portadora **no es afectada** por el proceso de modulación. Además, debido a que la potencia total en la onda AM es la suma de las potencias de la portadora y de la banda lateral, la potencia total en una envolvente de AM incrementa con la modulación (es decir, conforme m incrementa P_t incrementa).

La figura 3-12 muestra el espectro de potencia para una onda AM DSBFC. Observe que con 100% de modulación la máxima potencia en la banda lateral superior o inferior es igual a sólo una cuarta parte de la potencia en la portadora. Por lo tanto, la máxima potencia total de las bandas laterales es igual a la mitad de la potencia de la portadora. Una de las desventajas más importantes de la transmisión AM DSBFC es el hecho que la información está contenida en las bandas laterales aunque la mayoría de la potencia se desperdicia en la portadora. En realidad, la potencia en la portadora no es totalmente

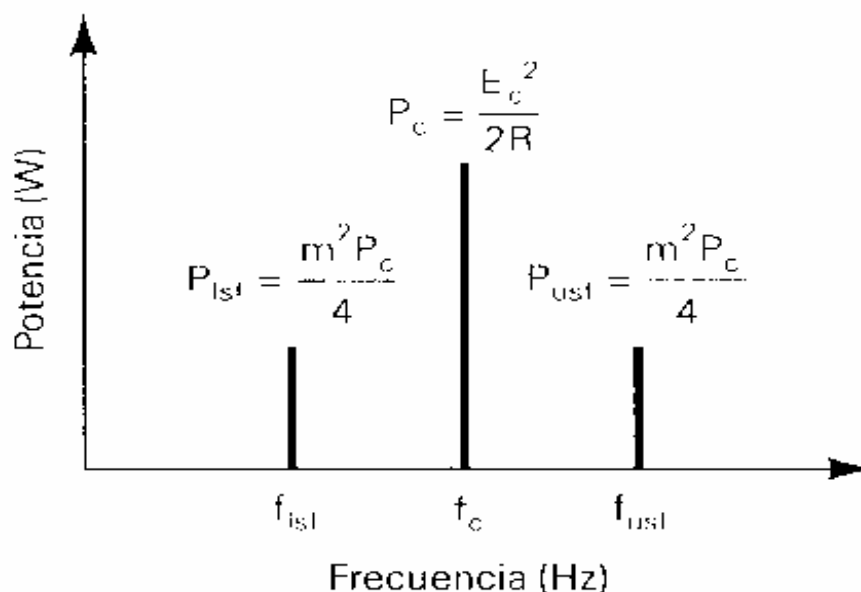


Figura 3-12 Espectro de potencia para una onda AM DSBFC

desperdiciada puesto que permite el uso de circuitos de demodulación baratos y relativamente sencillos en el receptor, la cual es la ventaja predominante de un AM DSBFC. (Acceso masivo a la información)

EJEMPLO 3-4

Para una onda AM DSBFC con un voltaje pico de la portadora no modulada $V = 10 \text{ Vp}$, una resistencia de carga $R_L = 10 \Omega$, y el coeficiente de modulación $m = 1$, determine:

- Potencias de la portadora y las bandas laterales superior e inferior.
- Potencia total de la banda lateral.
- Potencia total de la onda modulada.
- Dibuje el espectro de potencia.
- Repita los pasos hasta d) para un índice de modulación $m = 0.5$.

Solución (a) La potencia de la portadora se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-14:

$$P_c = \frac{10^2}{2(10)} = \frac{100}{20} = 5W$$

La potencia de la banda lateral superior e inferior se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-16:

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{(1^2)(5)}{4} = 1,25W$$

(b) La potencia total de la banda lateral es

$$P_{sbt} = \frac{m^2 P_c}{2} = \frac{(1)^2(5)}{2} = 2,5W$$

(c) La potencia total en la onda modulada se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-20

$$P_t = 5\left[1 + \frac{1^2}{2}\right] = 7,5W$$

(d) El espectro de potencia se muestra en la figura 3-13.

(e) La potencia de la portadora se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-14:

$$P_c = \frac{10^2}{2(10)} = \frac{100}{20} = 5W$$

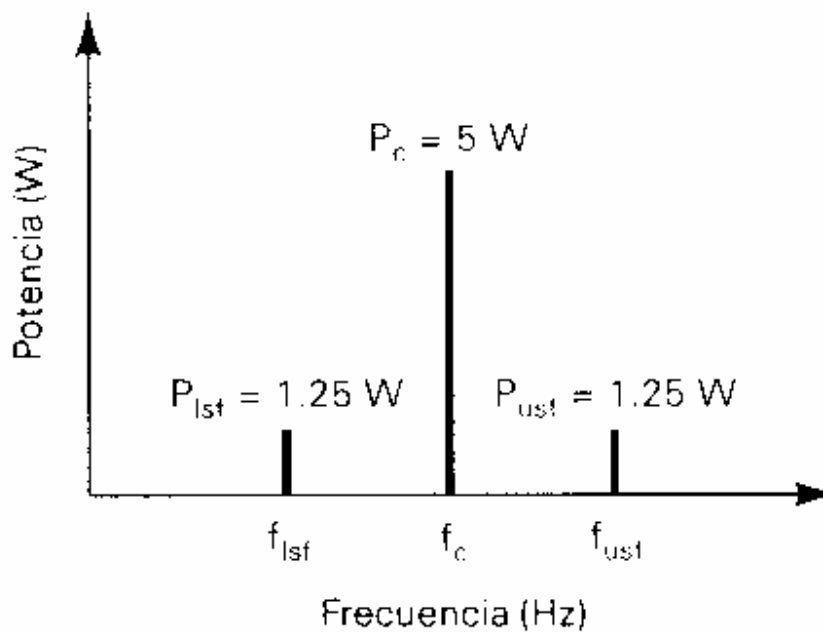


Figura 3-13 Espectro de potencias para el ejemplo

La potencia de la banda lateral superior e inferior se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-16:

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{(0,5)^2(5)}{4} = 0,3125W$$

El total de la potencia de la banda lateral es

$$P_{sbt} = \frac{m^2 P_c}{2} = \frac{(0,5)^2 (5)}{2} = 0,625W$$

El total de potencia de la onda modulada se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-20

$$P_t = 5[1 + \frac{0,5^2}{2}] = 5,625W$$

El espectro de potencia es mostrado en la figura 3-14.

Del ejemplo 3-4, puede observarse por que es importante utilizar la cantidad más alta del porcentaje de modulación que sea posible, mientras se asegure de no sobremodular. Como lo muestra el ejemplo, la potencia de la portadora permanece igual conforme “**m**” cambia.

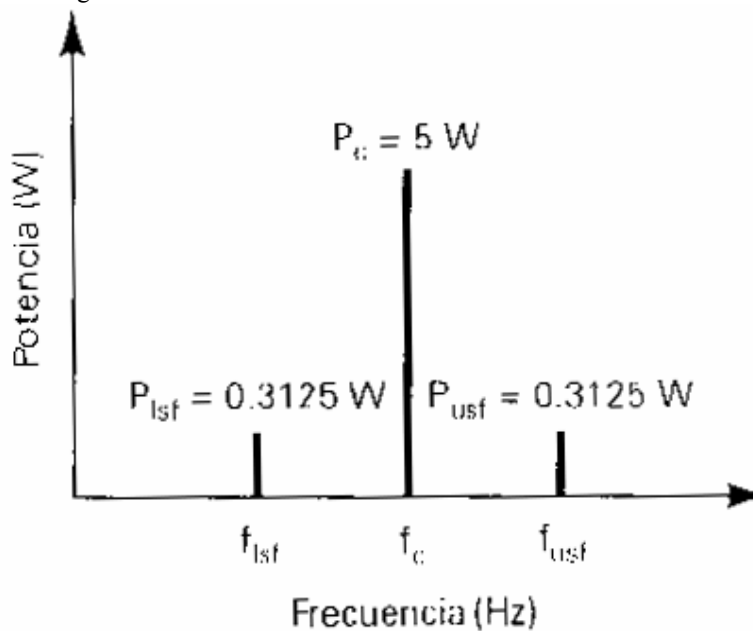


Figura 3-14 Espectro de potencia para el ejemplo 3-4e

Sin embargo, la potencia de la banda lateral **se redujo** dramáticamente cuando **m** disminuyó de 1 a 0.5. Debido a que la potencia de la banda lateral es proporcional al cuadrado del coeficiente de la modulación, una reducción en **m** a la mitad resulta en una reducción en la potencia de la banda lateral en una cuarta parte (es decir, $0.5^2 = 0.25$). La relación entre el coeficiente de modulación y la potencia puede a veces ser engañosa porque el total de la potencia transmitida consiste principalmente de la potencia de la portadora y, por lo tanto, no afecta dramáticamente a los cambios en **m**. Sin embargo, debe observarse que la potencia en la porción del transporte inteligente de la señal transmitida (es decir, las bandas laterales) es afectada dramáticamente por los cambios en **m**. Por esta razón, los sistemas AM DSBFC tratan de mantener un coeficiente de modulación entre 0.9 y 0.95 (90% a 95% de modulación) para las señales inteligentes de amplitud más alta.

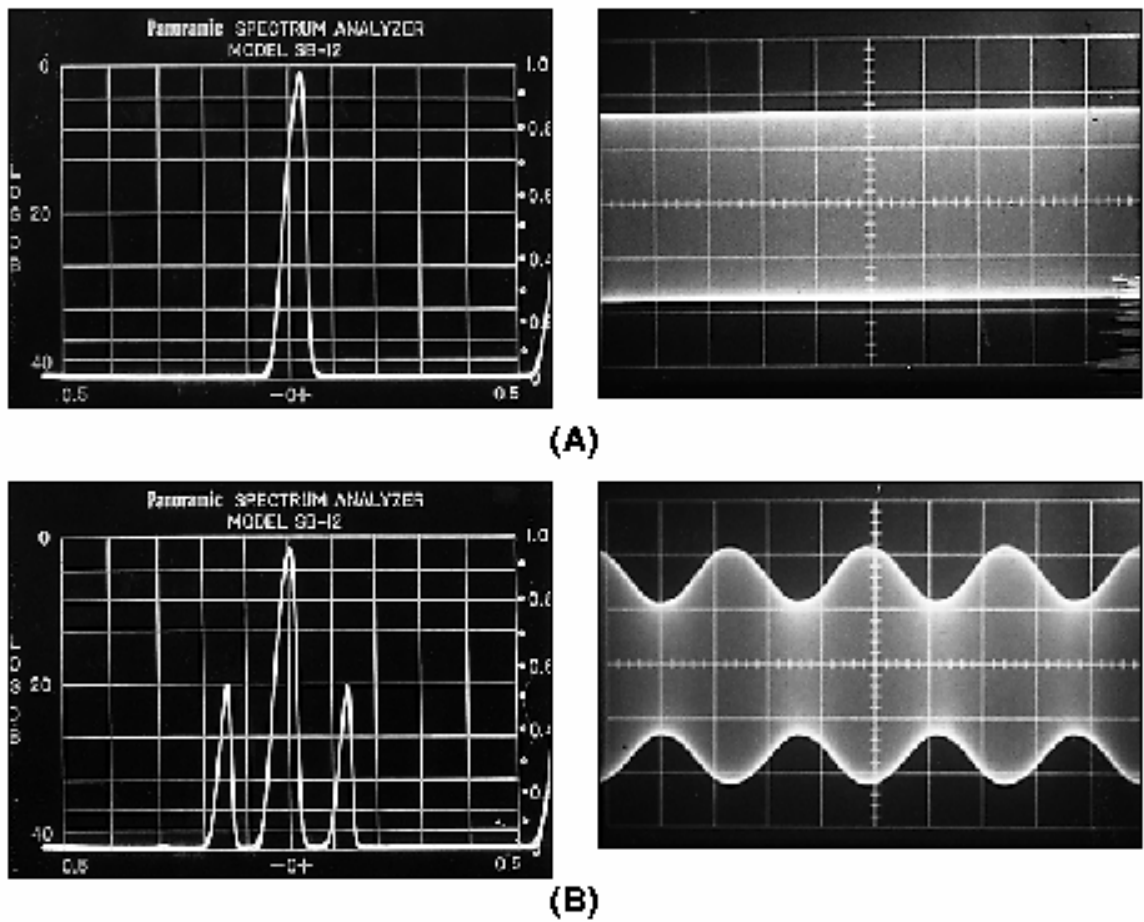


Figura 3-15 (A) Una portadora única no modulada; espectro y señal en el tiempo. (B) Portadora de AM modulada con un solo tono sinusoidal; se ven la portadora y las dos frecuencias laterales.