

Capítulo 1

Modulación en amplitud

INTRODUCCIÓN

La *modulación* es el proceso de colocar la información contenida en una señal electrónica de baja frecuencia en una señal de alta frecuencia. A la señal de alta frecuencia se la denomina *portadora* y a la señal de baja frecuencia *señal moduladora*. Si al colocar la información sobre la portadora se ocasiona que su amplitud varíe de acuerdo con la señal moduladora, se designa al método como *modulación en amplitud*.

La ventaja de transmitir la señal de alta frecuencia es doble. Primero, si todas las estaciones de radio difunden en forma simultánea en frecuencias de audio no podrían diferenciarse unas de otras y se recibiría una mezcla ininteligible. Segundo, se ha encontrado que para la transmisión de frecuencias de *audio* se requieren antenas de 5 a 5 000 m de magnitud.

DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA

La descripción matemática de una onda portadora no modulada es

$$A_p \sin 2\pi f_p t$$

en donde f_p es la frecuencia portadora y A_p es el valor pico de la portadora no modulada.

Si, para simplificar, un tono de audio simple es tomado como la señal moduladora, éste se puede representar por

$$A_m \sin 2\pi f_m t$$

en donde f_m es la frecuencia del tono de audio y A_m es el valor pico de la señal moduladora (véase la Fig. 1-1).

La onda modulada se puede representar en forma matemática como el producto

$$(A + B \sin 2\pi f_a t)(\sin 2\pi f_c t)$$

en donde f_a es la frecuencia de la señal moduladora de audio y f_c es la frecuencia de la portadora. Factorizando, se obtiene

$$A \left(1 + \frac{B}{A} \sin 2\pi f_a t \right) (\sin 2\pi f_c t)$$

En función del voltaje, se tiene

$$v = V_c \left(1 + \frac{B}{A} \sin 2\pi f_a t \right) (\sin 2\pi f_c t)$$

en donde V_c es el voltaje pico de la portadora no modulada, representada hasta ahora por A .

Al emplear la identidad trigonométrica

$$(\sin X)(\sin Y) = \frac{1}{2} \cos(X - Y) - \frac{1}{2} \cos(X + Y)$$

la ecuación que describe a la onda modulada en amplitud se puede escribir como

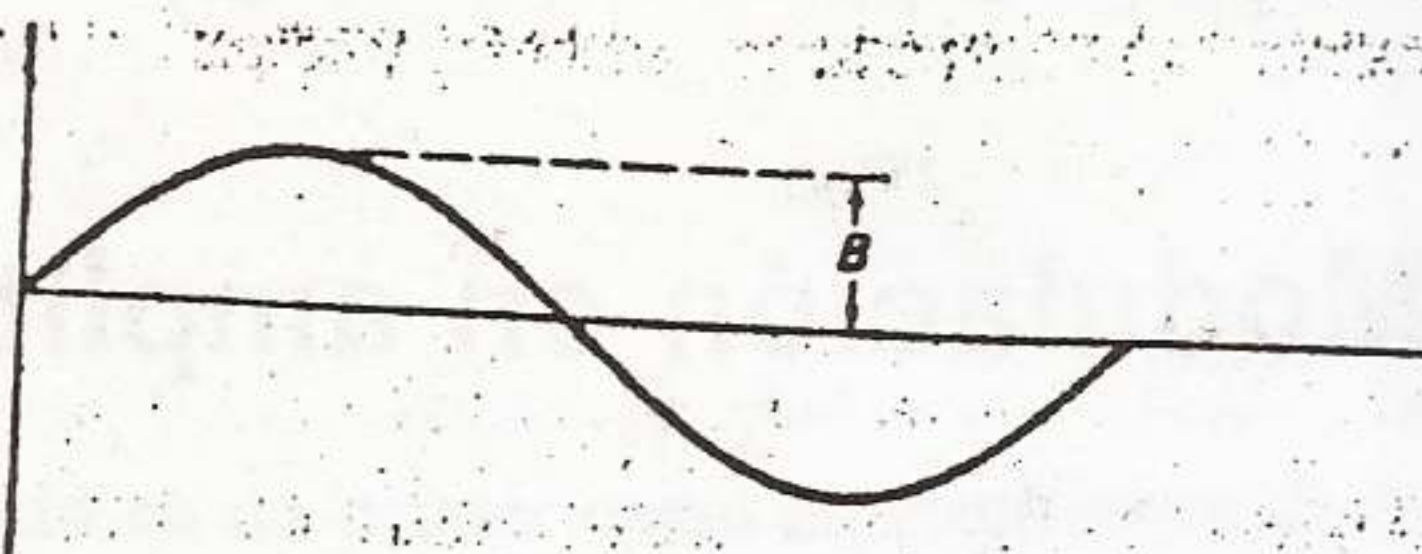
$$v = V_c \sin 2\pi f_c t + \frac{mV_c}{2} \cos 2\pi(f_c - f_a)t - \frac{mV_c}{2} \cos 2\pi(f_c + f_a)t$$

en donde m es designado como *factor de modulación* y definido como

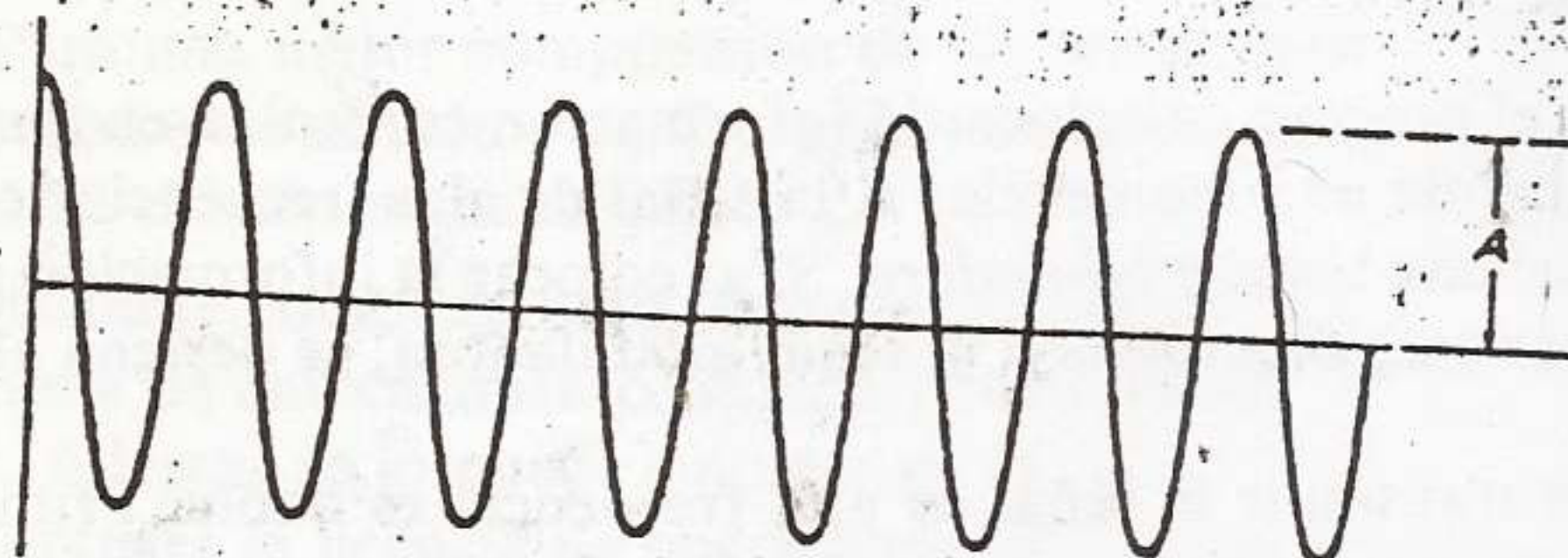
$$m = \frac{\text{valor pico de la señal moduladora}}{\text{valor pico de la portadora no modulada}}$$

MODULACIÓN EN AMPLITUD

[CAP. I]

Señal de audio
conteniendo
información
(señal de modulación)

Onda portadora



Onda modulada

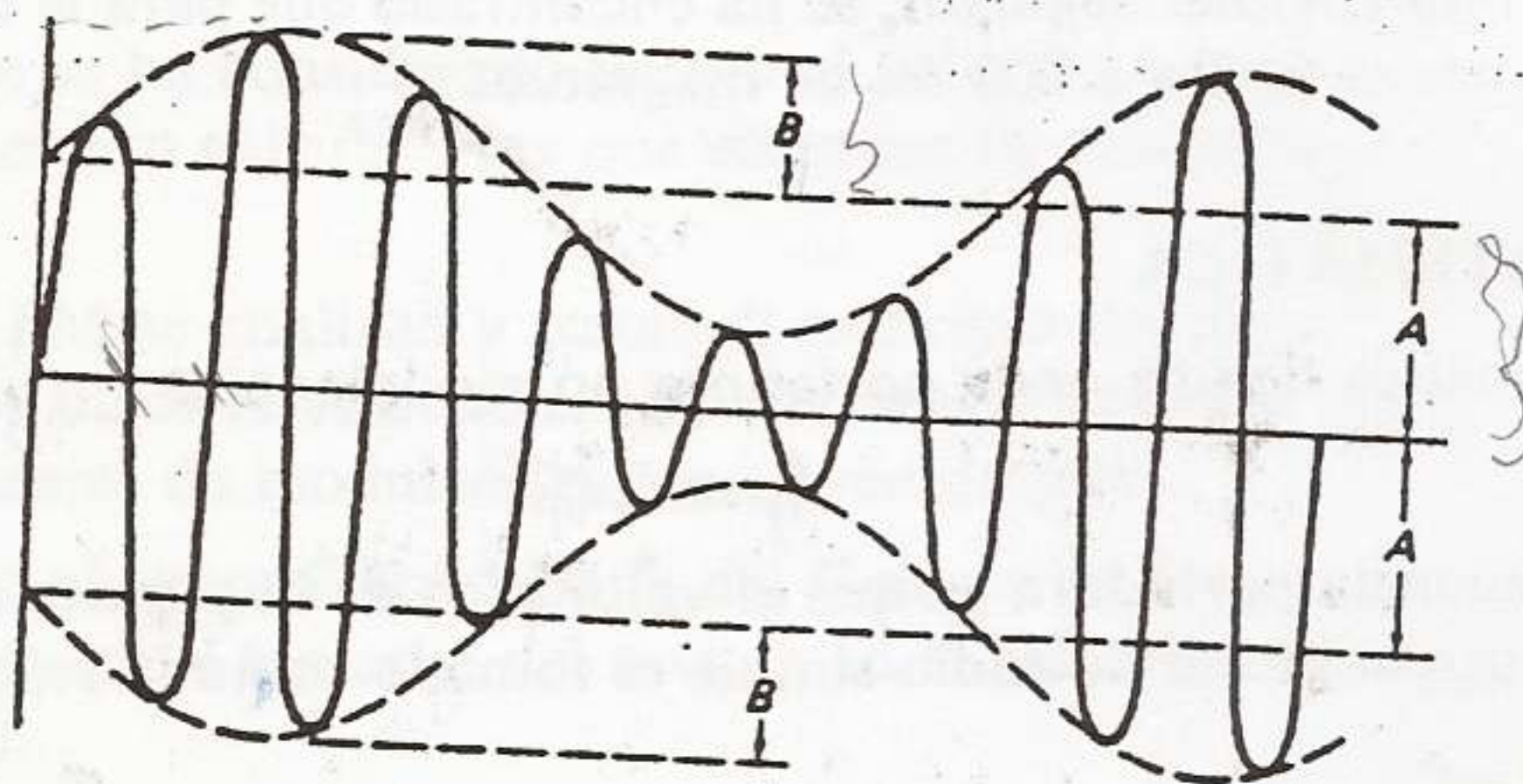


Figura 1-1

Cuando se expresa como porcentaje recibe la designación de *porcentaje de modulación*, M . Empleando la notación de la figura 1-1,

$$m = \frac{B}{A}$$

$$M = \frac{B}{A} \times 100\%$$

El porcentaje de modulación puede variar en cualquier caso de 0 a 100% sin que se introduzca distorsión. Si se permite que el porcentaje de modulación se incremente más allá del 100% se producirá una distorsión acompañada de frecuencias extrañas e indeseables. La figura 1-2 muestra tres grados de modulación: (a) submodulación ($M < 100\%$), (b) modulación al 100% y (c) sobremodulación ($M > 100\%$).

En relación con la ecuación anterior que describe a la onda modulada en amplitud se ve que la onda modulada tiene tres componentes: la primera a una frecuencia f_c , la segunda a una frecuencia $f_c + f_m$ y la tercera a una frecuencia $f_c - f_m$, las cuales producen el espectro frecuencia contra voltaje que se muestra en la figura 1-3(a).

La frecuencia $(f_c + f_m)$ recibe la designación de *frecuencia lateral superior* y $(f_c - f_m)$ la de *frecuencia lateral inferior*. En la mayor parte de los casos la información de audio que se difunde no está formada por una sola onda senoidal pura. Es frecuente encontrar formas de onda realmente complejas. Cualquier forma de onda compleja se puede considerar como la suma de un conjunto de ondas senoidales puras.

MODULACIÓN
EN PORCENTAJETres
ComponentesFrec.
Lateral
superior
Frec.
Lateral
inferior

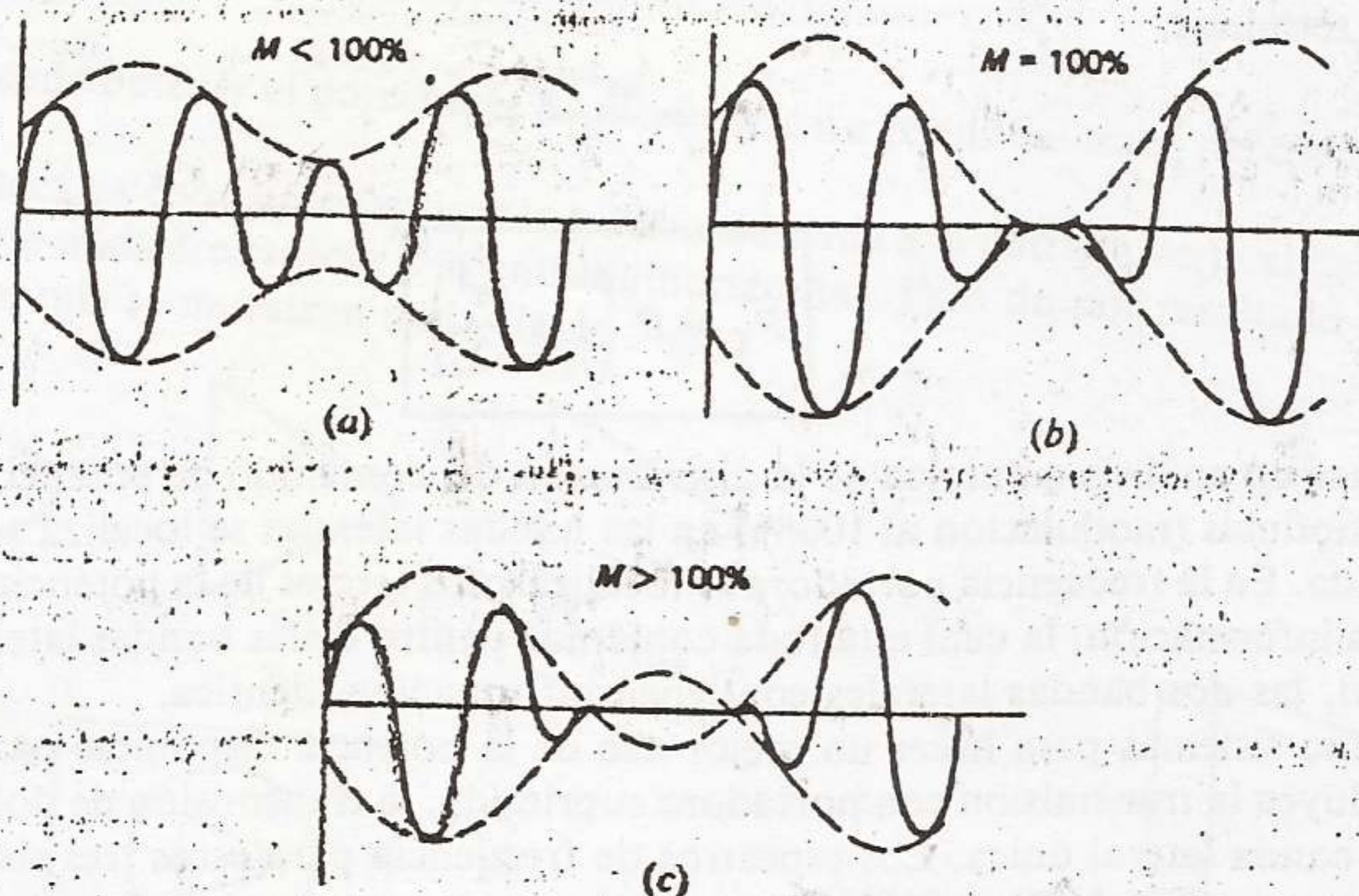


Figura 1-2

Así, cada una de las ondas senoidales que constituyen la onda de audio compleja tendrá tanto la frecuencia lateral superior como la inferior, las cuales podrán encontrarse en el análisis de la onda modulada. En vez de analizar las frecuencias laterales superior e inferior, se hará referencia a las frecuencias de las bandas laterales superior e inferior.

Por lo tanto se puede ver que una estación de radio con la que se pretende difundir información que contenga frecuencias de 0 a 5 000 Hz (5 kHz) necesita una banda lateral superior de 5 kHz y una banda lateral inferior de 5 kHz para satisfacer un requisito de ancho de banda total de 10 kHz. Según las normas de la Comisión Federal de Comunicaciones se permite a una estación en la banda de difusión en AM un ancho de banda de 10 kHz.

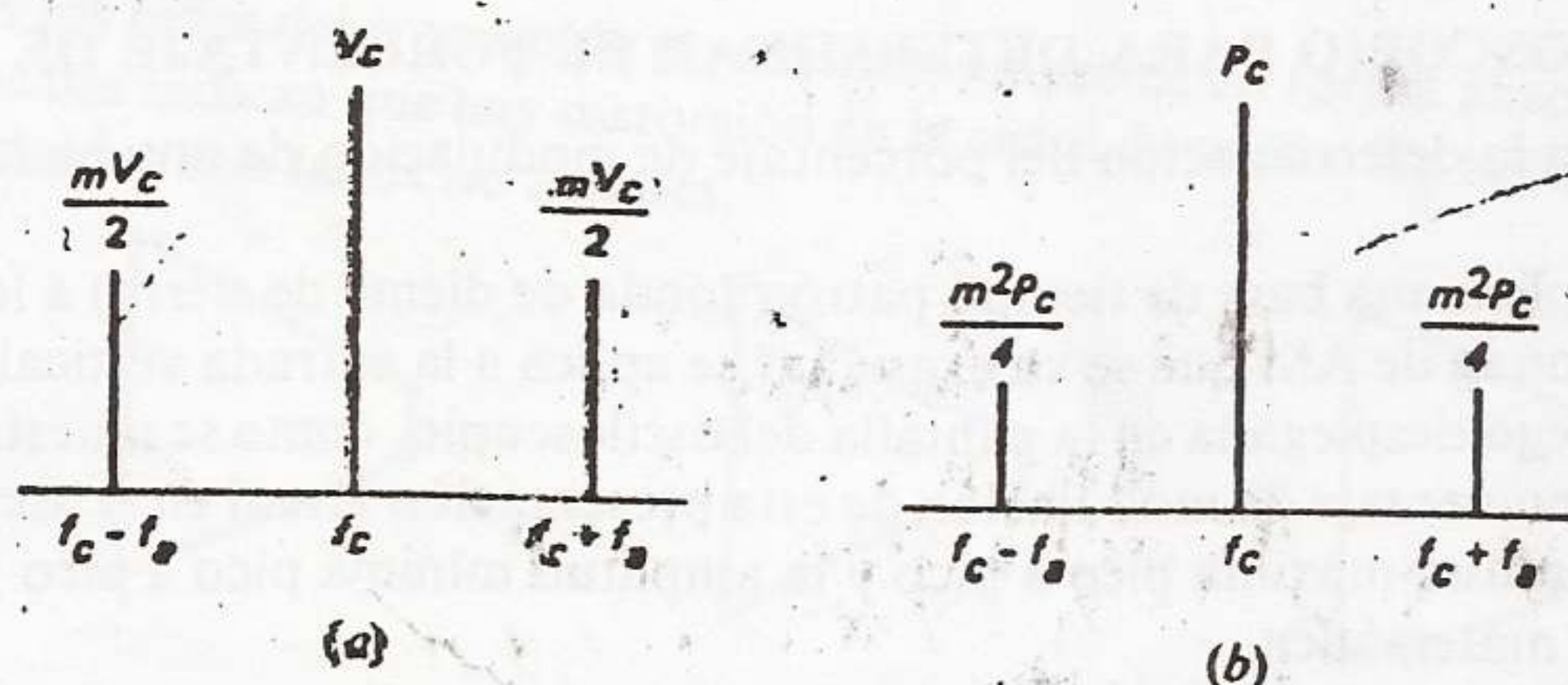


Figura 1-3

CONTENIDO DE POTENCIA

Puesto que la potencia es proporcional al cuadrado del voltaje, el espectro de la potencia contra la frecuencia para una onda modulada en amplitud se asemeja al que se muestra en la figura 1-3(b). Cada banda lateral tiene un contenido de potencia igual a $m^2P_c/4$ en donde P_c es el contenido de potencia de la señal en la frecuencia portadora.

Así, la potencia total es

$$P_T = \frac{m^2P_c}{4} + \frac{m^2P_c}{4} + P_c$$

en donde P_c es el contenido de potencia de la portadora y es independiente del porcentaje de modulación en una transmisión de AM.

Problemas

1.1 a 1.5

Combinando términos,

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

Si se factoriza

$$P_T = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right)$$

Cuando se hace un análisis numérico de la distribución del contenido de potencia se encuentra que bajo condiciones óptimas (modulación al 100%) en las bandas laterales se localiza sólo un tercio de la potencia transmitida. En la frecuencia portadora se localizan dos tercios de la potencia y no se encuentra contenida ninguna información, la cual está toda contenida dentro de las bandas laterales superior e inferior. En realidad, las dos bandas laterales contienen información idéntica.

Se han diseñado sistemas para hacer un mejor uso de la potencia disponible para ser transmitida. Estos sistemas incluyen la transmisión con portadora suprimida, la transmisión de doble banda lateral y la transmisión de banda lateral única. Los espectros de frecuencia para estos tres sistemas de modulación utilizados se muestran en la figura 1-4. En esencia, en cada uno de estos sistemas se pone la potencia donde está la información. Una ventaja adicional del sistema de banda lateral única es que sólo se requiere para la transmisión la mitad del ancho de banda por lo que pueden transmitir en forma simultánea el doble de estaciones.

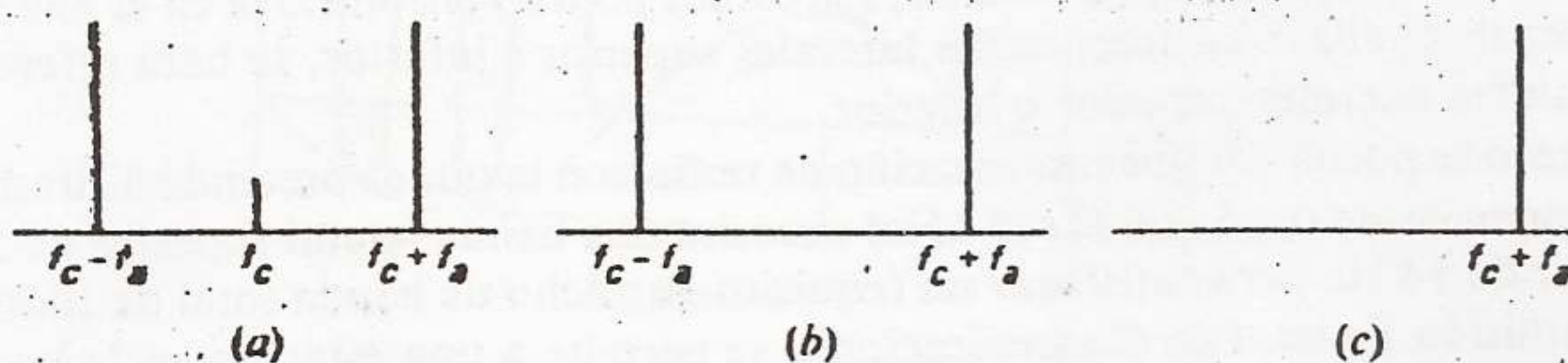


Figura 1-4

EMPLEO DEL OSCILOSCOPIO PARA DETERMINAR EL PORCENTAJE DE MODULACIÓN

Existen dos técnicas para la determinación del porcentaje de modulación de una onda de AM empleando el osciloscopio.

En una técnica se aplica una base de tiempo patrón (onda de diente de sierra) a la entrada horizontal del osciloscopio y la onda de AM que se va examinar se aplica a la entrada vertical del mismo aparato. La onda de AM es luego desplegada en la pantalla del osciloscopio, como se muestra en la figura 1-5.

Para determinar el porcentaje de modulación de esta presentación visual en el osciloscopio se divide la diferencia entre la amplitud máxima pico a pico y la amplitud mínima pico a pico por su suma. Examinando esto en forma matemática,

$$M = \frac{\text{máx } p-p - \text{mín } p-p}{\text{máx } p-p + \text{mín } p-p} \times 100$$

$$M = \frac{2(A + B) - 2(A - B)}{2(A + B) + 2(A - B)} \times 100$$

$$= \frac{4B}{4A} \times 100$$

$$= \frac{B}{A} \times 100$$

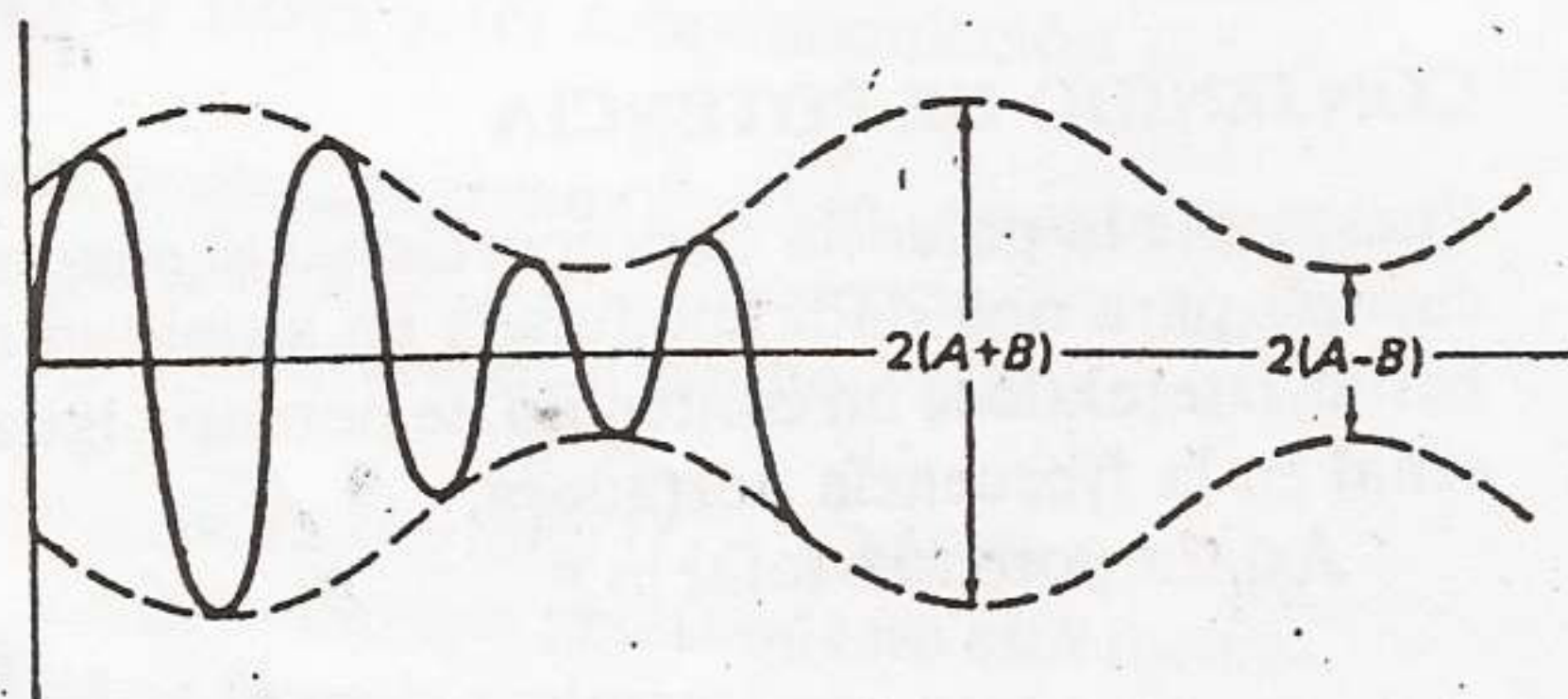


Figura 1-5

Así se puede obtener el porcentaje de modulación a partir del trazo del osciloscopio mostrado en la figura 1-5.

La otra técnica consiste en aplicar la señal modulada a la entrada vertical del osciloscopio y la señal moduladora de audiofrecuencia a la entrada horizontal. Esto da por resultado patrones trapezoidales tales como los que se muestran en la figura 1-6.

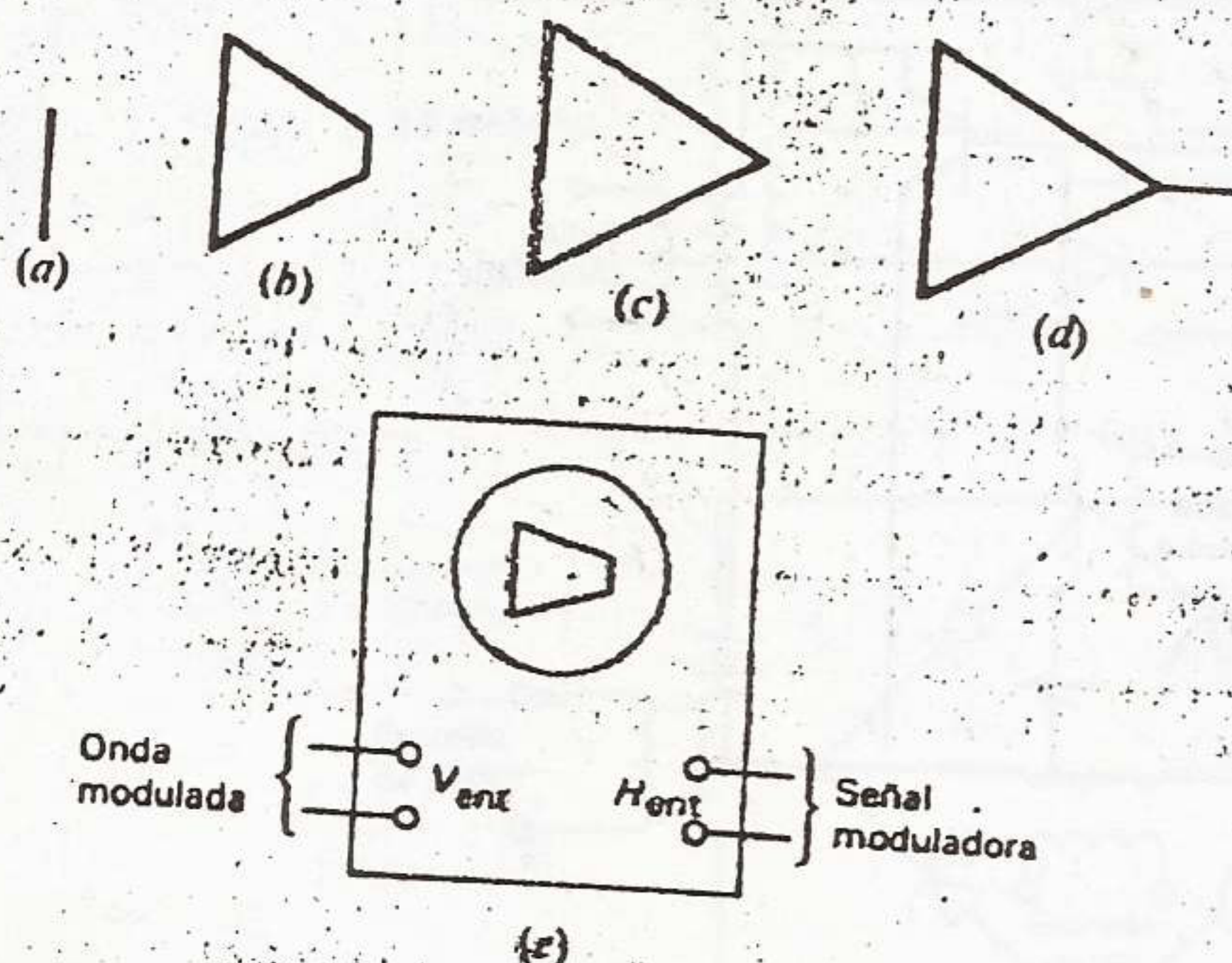


Figura 1-6



Figura 1-7

El porcentaje de modulación se puede obtener del patrón trapezoidal de la figura 1-7 con el uso de la fórmula

$$M = \frac{X - Y}{X + Y} \times 100$$

Algunas veces los lados del trapecio no resultan ser rectos en forma absoluta. Si los lados del trapecio no son lineales indican que hay distorsión en la señal de salida. En la figura 1-8 se muestran dos ejemplos de trapecios con lados no lineales.



Figura 1-8

EL TRANSMISOR DE AM

La figura 1-9 es un diagrama en bloques de un transmisor de AM. Sin importar lo complicado que pueda resultar un transmisor de AM en forma básica es el mismo que se ve en la figura 1-9.

Es necesario tener un dispositivo no lineal en el sistema a fin de que se dé la modulación, o sea, crear las frecuencias suma y diferencia necesarias para que aparezcan las bandas laterales.



Figura 1-9