

Cap. 6.3.-Requerimientos del ancho de banda para las ondas, con modulación angular

En 1922, J. R. Carson comprobó matemáticamente que para una frecuencia de señal modulante dada, una onda de modulación en frecuencia, no puede acomodarse en un ancho de banda más angosto que una onda de modulación en amplitud. Del análisis anterior y en el ejemplo 6-2, puede observarse que el ancho de banda de una onda de modulación angular es una función de la frecuencia de la señal modulante e índice de modulación. Con la modulación angular, se producen varios conjuntos de bandas laterales y, consecuentemente, el ancho de banda puede ser de manera significativa más ancho que el de una onda de modulación en amplitud con la misma señal modulante. La forma de onda de salida del modulador en el ejemplo 6-2 requiere 6 KHz. de ancho de banda para pasar la portadora y todas las frecuencias laterales importantes. Un modulador de doble banda lateral de AM convencional requiere de sólo 2 KHz. de ancho de banda, y un sistema de banda lateral única, de sólo 1 KHz.

Las formas de ondas de modulación angular se clasifican generalmente como de *índice bajo, mediano o alto*. Para el caso del índice bajo, la desviación de fase pico (índice de modulación), es menor que 1 rad, y el caso de índice alto ocurre cuando la desviación de fase pico es mayor que 10 rad. Los índices de modulación, mayores de 1 y menores que 10, se clasifican como un índice mediano. De la tabla 6-2 puede observarse que con la modulación angular de índice bajo la mayoría de la información de la señal se cargará por el primer conjunto de bandas laterales, y el mínimo de ancho de banda requerido es aproximadamente, igual al doble de la frecuencia de la señal modulante más alta. Por esta razón, los sistemas de FM de índice bajo a veces se llaman *banda angosta de FM* Para una señal de índice alto, se puede utilizar un método para determinar el ancho de banda llamado *cuasi-estacionario*. Con este método, se asume que la señal modulante está cambiando lentamente. Por ejemplo, para un modulador de FM con una sensibilidad de desviación $K_f = 2 \text{ kHz/V}$ y una señal modulante 1 V_p , la desviación de frecuencia pico $\Delta f = 2000 \text{ Hz}$.

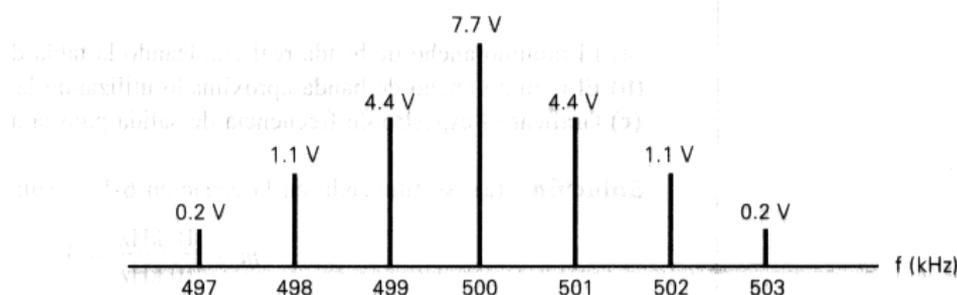


Figura 6-13 Espectro de la señal según la frecuencia

Si la frecuencia de la señal modulante es muy lenta, el ancho de banda se determina por la desviación de la frecuencia pico-a-pico. Por lo tanto, para los índices de modulación más grandes, el mínimo ancho de banda requerido, para propagar una onda de modulación en frecuencia es aproximadamente igual a la desviación de la frecuencia pico-a-pico ($2\Delta f$)

Por lo tanto, para la modulación de índice muy pequeño, el espectro de frecuencia es semejante a la doble banda lateral de AM y el mínimo ancho de banda es aproximado de la siguiente manera

$$B = 2fm \text{ (hertz)} \quad (6-18)$$

y para la modulación de índice alto, el mínimo de ancho de banda se aproxima de la siguiente manera

$$B = 2\Delta f \text{ (hertz)} \quad (6-19)$$

El ancho de banda real requerido, para pasar todas las bandas laterales importantes, para una onda de modulación angular, es igual a dos veces el producto de la frecuencia de la señal modulante más alta y el número de bandas laterales importantes determinado por las funciones de la tabla de Bessel. Matemáticamente, la regla para determinar el mínimo ancho de banda para una onda de modulación angular utilizando la tabla Bessel es

$$B = 2(n \times fm) \text{ (hertz)} \quad (6-20)$$

en donde $n = \text{número de bandas laterales significativas}$
 $fm = \text{frecuencia de la señal modulante (hertz)}$

En un memorando no publicado, con fecha 28 de agosto de 1939, Carson estableció una regla general, para calcular aproximadamente el ancho de banda, para los sistemas de modulación angular, sin importar el índice de modulación. Esta se llama la *regla de Carson*. Simplemente dicho, la regla de Carson aproxima el ancho de banda de una onda de modulación angular como el doble de la suma de la desviación de frecuencia pico y la máxima frecuencia de la señal modulante. Matemáticamente dicha, la regla de Carson es

$$B = 2[\Delta f + f_{m(máx)}] \text{ (hertz)} \quad (6-21)$$

en donde $\Delta f = \text{máxima desviación de frecuencia (hertz)}$

$f_{m(máx)} = \text{frecuencia más alta modulante de la señal (hertz)}$

La regla de Carson es una aproximación y proporciona anchos de banda de transmisiones que son un poco más angostos que los anchos de banda determinados utilizando la tabla de Bessel y la ecuación 6-20. La regla de Carson define un ancho de banda que incluye aproximadamente el 98% de la potencia total en la onda modulada. El ancho de banda real necesario es una función de la forma de onda de la señal modulante y la calidad de la transmisión deseada.

EJEMPLO 6-3

Para un modulador de FM con una desviación de frecuencia pico $\Delta f = 10 \text{ kHz}$, una frecuencia de señal modulante $f_m = 10 \text{ kHz}$, $V_c = 10V$ y una portadora de 500 kHz , determine:

- (a) El mínimo ancho de banda real empleando la tabla de función Bessel.
- (b) El mínimo ancho de banda aproximado utilizando la regla de Carson.
- (c) Graficar el espectro de frecuencia de salida para la aproximación de Bessel.

Solución (a) Sustituyendo en la ecuación 6-13 resulta

$$m = \frac{10\text{kHz}}{10\text{kHz}} = 1$$

De la tabla 6-2, un índice de modulación de 1 rinde tres conjuntos de bandas laterales significativas. Sustituyendo en la ecuación 6-20, el ancho de banda es

$$B = 2(3 \times 10 \text{ kHz}) = \mathbf{60 \text{ kHz}}$$

(b) Sustituyendo en la ecuación 6-21, el mínimo ancho de banda es

$$B = 2(10 \text{ kHz} + 10 \text{ kHz}) = 40 \text{ kHz}$$

(c) El espectro de frecuencia de salida para la aproximación de Bessel se muestra en la figura 6-7.

En el ejemplo 6-3 puede verse que existe una diferencia importante, en el mínimo ancho de banda, determinada por la regla de Carson y el mínimo ancho de banda, determinado de la tabla de Bessel. El ancho de banda de la regla de Carson es menor que el mínimo ancho de banda requerido para pasar a todos los conjuntos de bandas laterales significativas como está definido por la tabla de Bessel. Por lo tanto, un sistema que se diseñó usando la regla de Carson tendría un ancho de banda más angosto y, por lo tanto, el rendimiento es más pobre que el de un sistema diseñado usando la tabla de Bessel. Para los índices de modulación superiores a 5, la regla de Carson es una aproximación cercana al verdadero ancho de banda real requerido.

Relación de desviación.

Para un sistema de FM predeterminado, el mínimo ancho de banda es el más grande, cuando se obtiene la máxima desviación de frecuencia con la máxima frecuencia de la señal modulante (es decir, la modulación en frecuencia más alta ocurre con la máxima amplitud permitida) Por definición, la relación *de desviación* (DR), es el índice de modulación *del peor caso* y es *igual* a la máxima desviación de frecuencia dividida por la máxima frecuencia de la señal modulante. El índice de modulación del peor caso produce el espectro de frecuencia de salida más ancho. Matemáticamente, la relación de desviación es

$$DR = \frac{\Delta f_{(máx)}}{f_{m(máx)}} \quad (6-22)$$

en donde

DR = relación de desviación (sin unidad)

$\Delta f(máx)$ = máxima desviación de frecuencia (hertz)

$f_{m(máx)}$ = máxima frecuencia de la señal modulante (hertz)

Por ejemplo, para la porción de sonido de una estación de banda de radiodifusión de TV comercial, la máxima desviación de frecuencia, establecida por la CNC, es 50 kHz y la máxima frecuencia de la señal modulante es 15 kHz. Por lo tanto, la relación de desviación, para una estación de radiodifusión de televisión es

$$DR = \frac{50kHz}{15kHz} = 3,33$$

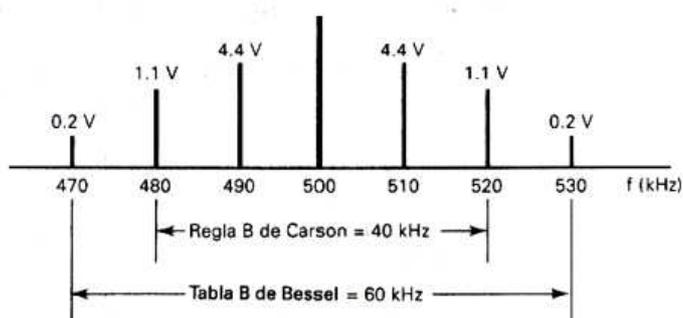


Figura 6-14 Espectro de frecuencia para el ejemplo 6-3

Esto no significa que cuando un índice de modulación de 3.33 ocurre, también ocurre el ancho de banda más grande, al mismo tiempo. Significa que cuando un índice de modulación de 3.33 ocurre para un máximo de frecuencia de la señal modulante, ocurre el ancho de banda más grande.

EJEMPLO 6-4

- Determine la relación de desviación y ancho de banda para el índice de modulación del peor caso (ancho de banda más grande) para un transmisor de banda de radiodifusión de FM con una desviación de frecuencia pico de 75 kHz y una máxima frecuencia de señal modulante de 15 kHz.
- Determine la relación de desviación y máximo ancho de banda para el índice de modulación igual, con sólo la mitad de la desviación de frecuencia pico y frecuencia de señal modulante.

Solución (a) La relación de desviación se encuentra sustituyendo en la ecuación 6-22.

$$DR = \frac{75kHz}{15kHz} = 5$$

De la tabla 6-2, un índice de modulación de 5 produce ocho bandas laterales significativas. Sustituyendo en la ecuación 6-20 resulta en

$$B = 2(8 \times 15,000) = 240 \text{ kHz}$$

(b) Para una desviación de frecuencia de 37.5 kHz y una frecuencia de señal modulante $f_m = 7.5 \text{ kHz}$, el índice de modulación es

$$m = \frac{37,5\text{kHz}}{7,5\text{kHz}} = 5$$

y el ancho de banda es

$$B = 2(8 \times 7500) = 120 \text{ kHz}$$

Del ejemplo 6-4 puede observarse que, aunque se logra el mismo índice de modulación (5), con dos diferentes frecuencias y amplitudes de la señal modulante, se produjeron dos diferentes anchos de banda. Un número infinito de combinaciones de la frecuencia de la señal de modulación y desviación de frecuencia producirán un índice de modulación de 5.

Sin embargo, el caso producido de la máxima frecuencia de la señal modulante y máxima desviación de frecuencia, siempre producirá el ancho de banda más grande.

Al principio podría parecer que un índice de modulación más alto, con una señal modulante más baja, generaría un ancho de banda mayor porque se producen más conjuntos de bandas laterales, pero recuerde que las bandas laterales estarían más cerca una de otra. Por ejemplo, una señal modulante de 1 kHz, que produce 10 kHz de desviación de frecuencia, tiene un índice de modulación de $m = 10$, y produce 14 conjuntos significativos de bandas laterales. Sin embargo, las bandas laterales están sólo desplazadas, una de otra, por 1 kHz y, por lo tanto, el total del ancho de banda es solo de 28.000 Hz [2(14 x 1000)]

Representación fasorial de una onda de modulación angular

Como con la amplitud modulada, una onda de modulación angular puede mostrarse en forma fasorial. El diagrama fasorial para una onda con modulación angular, con índice bajo, con una señal modulante de frecuencia única, se muestra en la figura 6-15. Para este caso especial ($m < 1$), sólo se considera el primer conjunto de pares de bandas laterales, y el diagrama fasorial se parece al de una onda AM, excepto por una inversión de fase de una de las frecuencias laterales. El vector resultante tiene una amplitud cercana a la unidad en todo momento y desviación de fase pico de m radianes. Es importante observar que si las frecuencias laterales de los términos de orden mayor fuesen incluídas, el vector no tendría variaciones de amplitud. La línea interrumpida en la figura 6-15e, es el lugar geométrico resultante formado por la portadora y el primer conjunto de frecuencias laterales.

La figura 6-16 muestra el diagrama fasorial para una onda de modulación angular de índice alto, con cinco conjuntos de frecuencias laterales (para mayor sencillez, se muestran sólo los vectores para los primeros dos conjuntos) El vector resultante es la suma de la componente de la portadora y los componentes de las frecuencias laterales significativas, con sus magnitudes ajustadas de acuerdo a la tabla de Bessel. Cada frecuencia lateral se cambia de posición 90° adicionales a la frecuencia lateral anterior. El lugar geométrico de la aproximación resultante de los cinco componentes está en curva y sigue de manera cercana al lugar geométrico de la señal. Por definición, el lugar geométrico es un segmento circular, con un radio igual a la amplitud de la portadora no modulada. Debe observarse que la amplitud de la señal resultante y, consecuentemente, la potencia de la señal, permanecen constantes.

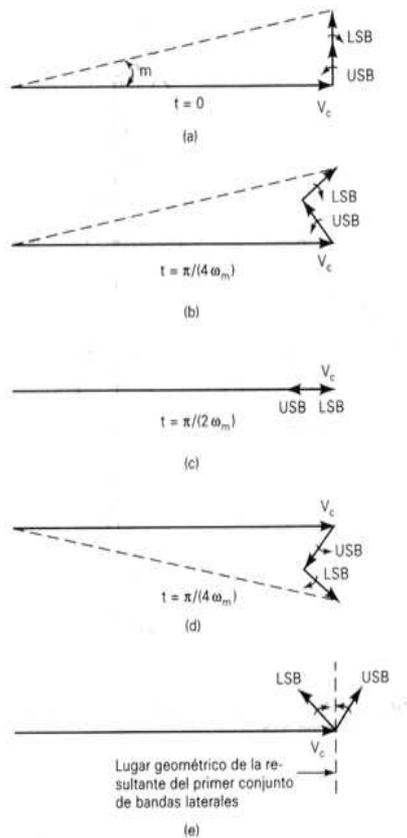


Figura 6.15 Diagrama fasorial

Potencia promedio de una onda de modulación angular

Una de las diferencias más importantes entre la modulación angular y la modulación en amplitud, es la distribución de potencia en la onda modulada. A diferencia de AM, la potencia total en una onda de modulación angular es igual a la potencia de la portadora no modulada (es decir, las bandas laterales no agregan potencia a la señal modulada compuesta). Por lo tanto, con la modulación angular, la potencia que estaba originalmente en la portadora sin modular es redistribuida entre el conducto y sus bandas laterales. La potencia promedio de una onda de modulación angular es independiente de la señal modulante, índice de modulación y desviación de frecuencia. Es igual a la potencia promedio de la portadora no modulada, sin importar la profundidad de la modulación. Matemáticamente, la potencia promedio de la portadora no modulada es

$$P_c = \frac{V_c^2}{2R} \text{ watts} \quad (6-23)$$

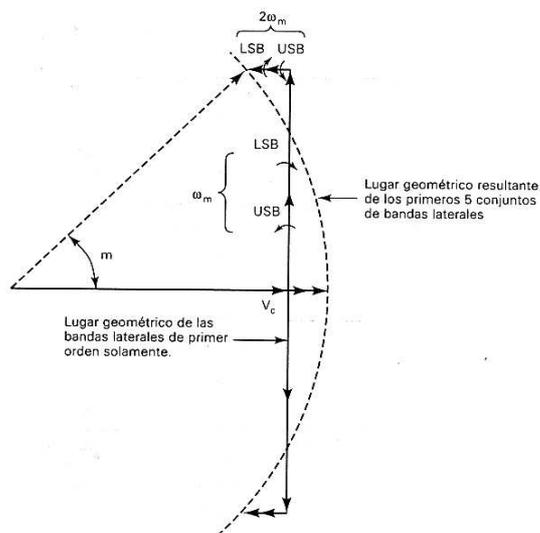


Figura 6.16. Lugar geométrico de las bandas laterales

en donde $P_c =$ potencia de la portadora (watts)
 $V_c =$ voltaje pico de la portadora no modulada (volts)
 $R =$ resistencia de carga (ohms)

La potencia total instantánea en una portadora de modulación angular es

$$p_t = \frac{m(t)^2}{R} \text{ watts} \quad (6-24a)$$

Al sustituir para $m(t)$ resulta en

$$p_t = \frac{V_c^2}{R} \cos^2[\omega_c t + \theta(t)] \quad (6-24b)$$

y expandiendo dará como resultado

$$p_t = \frac{V_c^2}{R} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos[2\omega_c t + 2\theta(t)] \right\} \quad (6-24c)$$

En la ecuación 6-24c, el segundo término consiste de un número infinito de componentes, de frecuencia lateral sinusoidal, sobre una frecuencia igual al doble de la frecuencia de la portadora ($2\omega_c$). Consecuentemente, el valor promedio del segundo término es cero, y la potencia promedio de la onda con modulación se reduce a

$$P_t = \frac{V_c^2}{2R} \text{ watts} \quad (6-25)$$

Observe que las ecuaciones 6-23 y 6-25 son idénticas, así que la potencia promedio de la portadora modulada debe ser igual a la potencia promedio de la portadora no modulada.

La potencia de la portadora modulada es la suma de las potencias de las portadoras y los componentes de frecuencias laterales. Por lo tanto, el total de la potencia de la onda modulada es

$$P_t = P_c + P_1 + P_2 + P_3 + P_n \quad (6-26)$$

$$P_t = \frac{V_c^2}{2R} + \frac{2(V_1^2)}{2R} + \frac{2(V_2^2)}{2R} + \frac{2(V_3^2)}{2R} + \frac{2(V_n^2)}{2R} \quad (6-27)$$

En donde
 P_t = potencia en el primer conjunto de bandas laterales
 P_c = potencia de la portadora
 P_2 = potencia en el segundo conjunto de bandas laterales
 P_3 = potencia en el tercer conjunto de bandas laterales
 P_n = potencia en el conjunto enésimo de bandas laterales

EJEMPLO 6-5

(a) Determine la potencia de la portadora no modulada para el modulador de FM y las condiciones proporcionadas en el ejemplo 6-2 (asuma una resistencia de carga $R_L = 50 \text{ S2}$).

(b) Determine la potencia total de la onda de modulación angular.

Solución (a) Sustituyendo en la ecuación 6-22 resulta en

$$P_c = \frac{10^2}{2(50)} = 1W$$

(b) Sustituyendo en la ecuación 6-27 nos da

$$P_c = \frac{7,7^2 + 2(4,4)^2 + 2(1,1)^2 + 2(0,2)^2}{2(50)} = 1,0051W$$

Los resultados de (a) y (b) no son exactamente iguales porque los valores proporcionados en la tabla de Bessel han sido redondeados. Sin embargo, los resultados son lo suficientemente cercanos para ilustrar que la potencia en la onda modulada y la portadora no modulada son iguales.

Modulación angular y ruido

Cuando el ruido térmico con una densidad espectral constante se agrega a una señal de FM, se produce una desviación de frecuencia no deseada de la portadora. La magnitud de esta desviación de frecuencia no deseada depende de la amplitud relativa del ruido con respecto a la portadora. Cuando esta desviación de la portadora no deseada es demodulada, se convierte en ruido si tiene los componentes de frecuencia que caen dentro del espectro de información-frecuencia. La forma espectral del ruido demodulado depende si se usó un demodulador FM o PM. El voltaje de ruido de la salida de un demodulador de PM es constante con la frecuencia, mientras que el voltaje de ruido en la salida de un demodulador de FM se incrementa en forma lineal con la frecuencia. Esto es comúnmente llamado el *triángulo de ruido de FM* y se ilustra en la figura 6-10. Puede

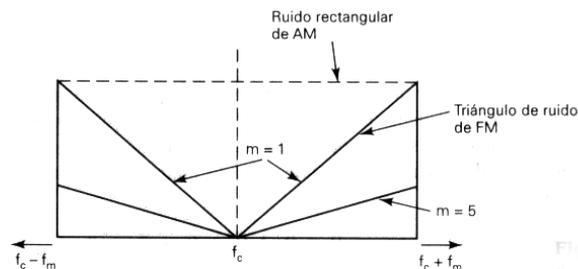


Figura 6.17.- Triángulo de ruido en FM

observarse que el voltaje de ruido demodulado es inherentemente mayor para las frecuencias de señal modulante más altas.

Modulación de fase debido a una senoide interferente.

La figura 6-11 muestra la modulación en fase causada por una señal de ruido de frecuencia única. La componente de ruido V_n se separa en frecuencia de la componente de la señal V_c por frecuencia f_n . Esto se muestra en la figura 6-11b. Asumiendo que $V_c > V_n$, la desviación pico de fase debido a una senoide de frecuencia única interferente ocurre cuando los voltajes de la señal y ruido están en cuadratura y se aproxima a los ángulos pequeños como

$$\Delta\theta(\text{pico}) \cong \frac{V_n}{V_c} \text{rad} \quad (6-28)$$

La figura 6-11c muestra el efecto de *limitar* la amplitud de la señal de FM compuesta sobre el ruido. (Limitar es comúnmente usado en los receptores de modulación angular y se explica más adelante en el curso) Puede observarse que la señal de ruido, de frecuencia única, fue transportada a un par de bandas laterales de ruido, con una amplitud de $V_n/2$. Estas bandas laterales son coherentes; por lo tanto, la desviación de fase pico aún es V_n/V_c radianes. Sin embargo, las variaciones de amplitud no deseadas han sido eliminadas, lo cual reduce la potencia total, pero no reduce la interferencia en la señal demodulada debida a la desviación de fase no deseada.

Modulación de frecuencia debida a una senoide interferente

De la ecuación 6-6a, la desviación de frecuencia instantánea $\Delta f(t)$ es la primera derivada en el tiempo, de la desviación de fase instantánea $\theta(t)$. Cuando la componente de la portadora es mucho más grande que el voltaje de ruido interferente, la desviación de fase instantánea es aproximadamente

$$\theta(t) = \frac{V_n}{V_c} = \text{sen}(\omega_n t + \theta_n) \text{radianes} \quad (6-29)$$

y, tomando la primera derivada, se obtiene

$$\Delta\omega(t) = \frac{V_n}{V_c} = \omega_n \cos(\omega_n t + \theta_n) \text{radianes/seg} \quad (6-30)$$

Por lo tanto, la desviación de frecuencia pico es [para $\cos(\omega_n t + \theta_n) = 1$]

$$\Delta\omega_{\text{pico}} = \frac{V_n}{V_c} = \omega_n \text{radianes/seg} = f_n \text{hertz} \quad (6-31 \text{ y } 6-32)$$

Arreglando la ecuación 6-13, puede observarse que la desviación de frecuencia pico (Δf) es una función de la frecuencia de la señal modulante y el índice de modulación. Por lo tanto, para una modulación en frecuencia de ruido f_n , la desviación de frecuencia pico es

$$\Delta f_{\text{pico}} = m f_n \text{ Hz} \quad (6-33)$$

en donde $m = \text{índice de modulación} (m < 1)$.

De la ecuación 6-33, puede observarse que mientras más lejos esté desplazada la frecuencia del ruido de la frecuencia de la portadora, mayor es la desviación de la frecuencia. Por lo tanto, las frecuencias de ruido que producen

componentes en el lado alto del espectro de frecuencia de la señal de modulación, producen más desviación de frecuencia para la misma desviación de fase que las frecuencias que caen en el lado inferior. Los demoduladores de FM generan un voltaje de salida que es proporcional a la desviación de frecuencia e igual a la diferencia entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la señal interferente. Por lo tanto, los componentes de ruido, de frecuencia alta, producen más ruido demodulado que los componentes de frecuencia baja.

La relación de señal-a-ruido a la salida de un demodulador de FM, debida a la desviación de frecuencia no deseada de una senoide interferente es la relación de la desviación de frecuencia pico debida a la señal de información con la desviación de frecuencia pico debida a la señal interferente.

$$\frac{S}{N} = \frac{\Delta f_{\text{debida a la señal}}}{\Delta f_{\text{debida al ruido}}} \quad (6-34)$$

EJEMPLO 6-6

Para una portadora de modulación angular $V_c = 6 \cos(2\pi 110 \text{ MHz } t)$ con 75 kHz de desviación de frecuencia debido a la señal de información y señal de interferencia de frecuencia única $V_n = 0.3 \cos(2\pi 109.985 \text{ MHz } t)$ determine:

- (a) La frecuencia de la señal de interferencia demodulada.
 (b) Desviación de fase y de frecuencia pico debida a la señal de interferencia. (c) Relación de señal-a-ruido de voltaje a la salida del demodulador.

Solución (a) La frecuencia de la interferencia de ruido es la diferencia entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia de la señal de interferencia de frecuencia única.

$$f_c - f_n = 110 \text{ MHz} - 109.985 \text{ MHz} = 15 \text{ kHz}$$

(b) Sustituyendo en la ecuación 6-28 resulta en

$$\Delta \theta_{\text{pico}} = 0,3/6 = 0.05 \text{ rad}$$

Sustituyendo en la ecuación 6-32 nos da

$$\Delta f_{\text{pico}} = \frac{0,3 \times 15 \text{ kHz}}{6} = 750 \text{ Hz}$$

(c) La relación S/N de voltaje debido al tono interferente es la relación de la amplitud de la portadora con la amplitud de la señal interferente, o

$$6/0,3 = 20$$

La relación S/N de voltaje después de la demodulación se encuentra sustituyendo en la ecuación 6-34:

$$\frac{S}{N} = \frac{75 \text{ kHz}}{750 \text{ Hz}} = 100$$

Por lo tanto, existe una mejora señal-a-ruido de voltaje de $100/20 = 5$ ó $20 \log 5 = 14 \text{ dB}$.

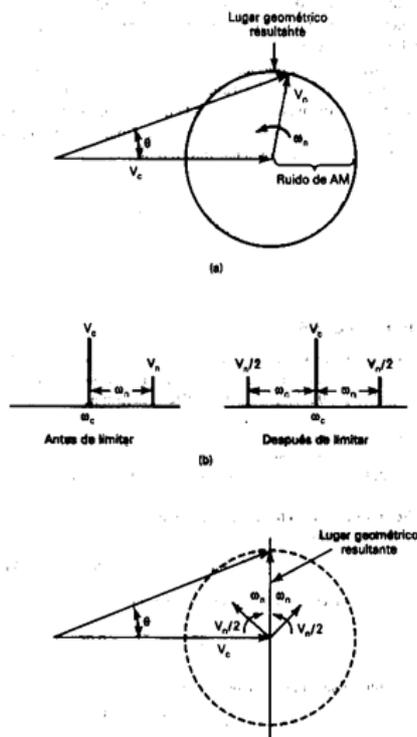


Figura 6-18 Sinusoidal interferente de ruido: (a) antes de limitar; (b) espectro de frecuencia; (c) después de limitar

Preénfasis y Deénfasis

El triángulo de ruido, mostrado en la figura 6-10, muestra que, con FM, existe una distribución uniforme de ruido. El ruido en las frecuencias de la señal modulante superiores, es inherentemente mayor en amplitud que el ruido en las frecuencias inferiores. Esto incluye la interferencia de frecuencia única y el ruido térmico. Por lo tanto, para las señales de información con un nivel de señal uniforme, se produce una relación señal-a-ruido no uniforme y las frecuencias de la señal modulante mayores tienen una relación señal-a-ruido más bajo que las frecuencias inferiores. Esto se muestra en la figura 6-12a. Puede observarse que la relación S/N es más baja en las orillas de la alta frecuencia del triángulo. Para compensar todo esto, las señales modulantes de alta frecuencia son enfatizadas o aumentadas en amplitud, en el transmisor, antes de realizar la modulación.

Para compensar este aumento, las señales de alta frecuencia son atenuadas o desenfatisadas en el receptor después de que se ha realizado la demodulación. Deénfasis es el recíproco de preénfasis, y, por lo tanto una red de deénfasis restaura las características originales de amplitud-vs-frecuencia a las señales de información.

La componente de fase del ruido crea modulación de fase de la señal. Si la potencia del ruido se distribuye de manera uniforme por el canal a la entrada del receptor (*ruido blanco*), la modulación de fase se distribuirá de la misma forma sobre el ancho de banda del receptor. Con un sistema de modulación de fase, la distribución del ruido resultante, después de la modulación también será de modo uniforme sobre el espectro de banda base.

Con un receptor de FM, la situación es diferente. El receptor interpreta la modulación de fase debida al ruido como modulación de frecuencia. Como ya se vio, la desviación de fase y frecuencia se relacionan mediante la ecuación (4.7):

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

Que puede expresarse como

$$\delta = m_f f_m$$

Recuerde que el índice de modulación m_f es solo la desviación pico de fase en radianes. La desviación de frecuencia es proporcional a la frecuencia de la modulante. La interpretación de esto es que si la desviación de fase debida al ruido térmico tiene una distribución aleatoria en el espectro de banda base, entonces, la amplitud del ruido demodulado será proporcional a la frecuencia. Esta relación entre el voltaje de ruido y la frecuencia se ilustra en la figura 4.14. Puesto que la potencia es proporcional al cuadrado del voltaje, la figura de ruido tiene el espectro parabólico mostrado en la figura.

Para mejorar el desempeño de un sistema de FM con respecto al ruido, puede incrementarse la desviación; pero hay límites, en cuanto al incremento, debido a las consideraciones acerca del *ancho de banda del canal* y la *razón de portadora a ruido de umbral*. No obstante se deduce que una desviación grande es más importante para frecuencias altas de modulación. Lamentablemente, para señales analógicas comunes (voz, música y video, entre otras) las componentes de alta frecuencia tienen amplitudes menores que las componentes de frecuencias medias y bajas.

Se logra una mejoría en la relación S/N si antes de la modulación se acentúan (preénfasis) estas altas frecuencias con una disminución correspondiente en el receptor (deénfasis) después de la etapa desmoduladora.

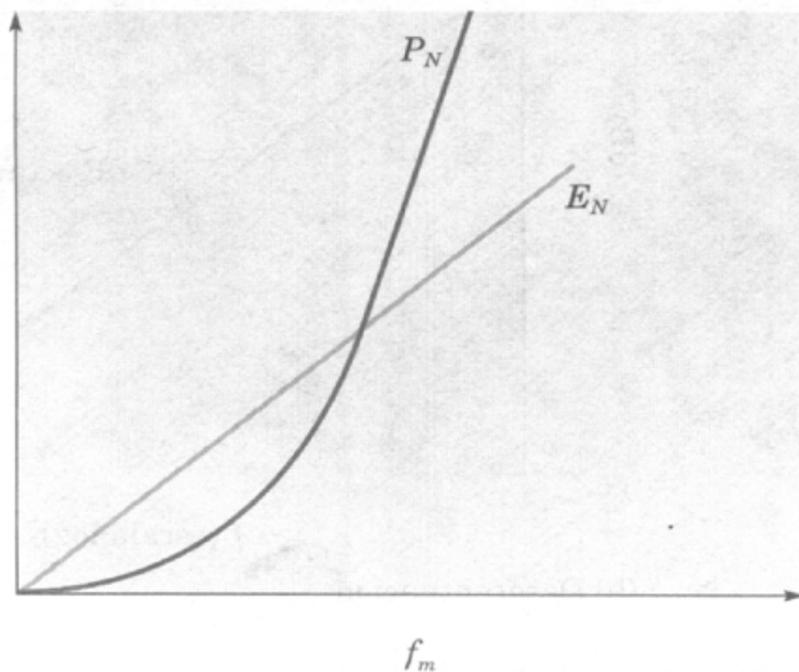


Figura 6.19 Espectro del ruido desmodulado en un sistema de FM (sin deénfasis)

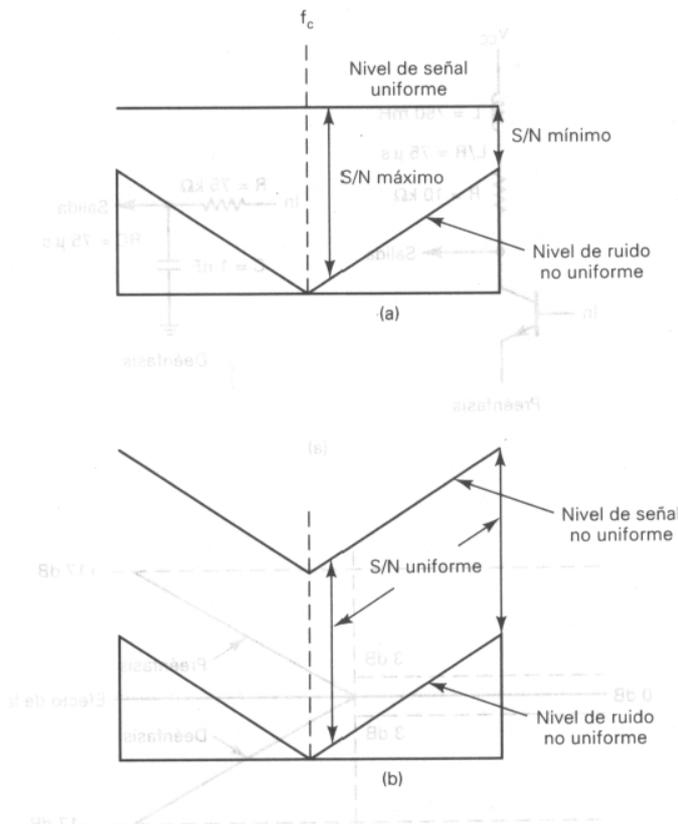


Figura 6-20.- Señal a ruido de FM: (a) sin preénfasis; (b) con preénfasis

Esencialmente, la red de preénfasis permite que las señales modulantes de alta frecuencia modulen la portadora a un nivel más alto y, por lo tanto, causen más desviación de frecuencia que la que sus amplitudes originales hubiesen producido. Las señales de alta frecuencia se propagan por el sistema a un nivel elevado (desviación de frecuencia incrementada), demoduladas y, después, restauradas a sus proporciones de amplitud originales. La figura 6-12b muestra los efectos de preénfasis y deénfasis sobre la relación señal-a-ruido. La Figura muestra que el preénfasis y deénfasis producen una relación señal-a-ruido más uniforme en el espectro de frecuencia de la señal modulante.

Una red de preénfasis es un filtro de pasa-altos (es decir, un diferenciador) y una red de deénfasis es un filtro de pasa-bajos (un integrador). La figura 6-20a muestra los diagramas esquemáticos para una red de preénfasis activa y una red de deénfasis pasiva. Las curvas de respuesta de frecuencia correspondientes se muestran en la figura 6-20b. Una red de preénfasis le proporciona un incremento constante en la amplitud de la señal modulante con un incremento en la frecuencia. Con FM, se logran aproximadamente 12 dB de mejoría en el rendimiento del ruido, utilizando preénfasis y deénfasis.

La frecuencia de corte (*la frecuencia en donde el preénfasis y deénfasis comienzan*) se determina por la constante de tiempo RC o L/R , de la red. La frecuencia de corte ocurre en la frecuencia en donde X_c o X_L es igual a R . Matemáticamente, la frecuencia de corte es

$$f_b = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6-35a)$$

$$f_b = \frac{1}{2\pi L/R} \quad (6-35b)$$

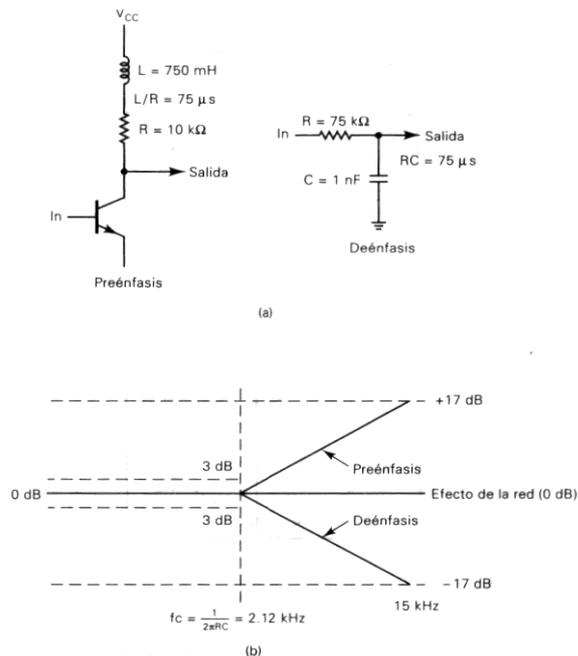


Figura 6-21 Preénfasis y deénfasis: (a) diagramas esquemáticos; (b) curvas de atenuación

Las redes mostradas en la figura 6-21 son para la banda de radiodifusión de FM, la cual utiliza una constante de tiempo de 75 μs. Por lo tanto, la frecuencia de corte es aproximadamente

$$f_b = \frac{1}{2\pi 75 \mu s} = 2,12 kHz$$

A pesar que la FM tiene cualidades de rechazo de ruido superiores, el ruido altera una señal de FM. Esto es en particular cierto para los componentes de alta frecuencia en la señal moduladora. Puesto que el ruido consiste principalmente en puntas estrechas de energía, tiene un número considerable de armónicas y otros componentes de alta frecuencia. Estas altas frecuencias en ocasiones pueden ser de una amplitud mayor que el contenido de alta frecuencia de la señal moduladora. Lo anterior produce una forma de distorsión de frecuencia que puede hacer ininteligible la señal.

La mayor parte del contenido de energía de una señal moduladora, en particular la voz, está en frecuencias más bajas. En los sistemas de comunicaciones de voz, el ancho de banda de la señal moduladora se limita deliberadamente a un máximo aproximado de 3 KHz. La voz sigue siendo inteligible a pesar de las limitaciones del ancho de banda. Después de todo, los teléfonos hacen el corte en 3 KHz. y proporcionan buena calidad de voz. Sin embargo, la música sufriría una severa distorsión por un ancho de banda tan estrecho como ése, ya que tiene componentes de alta frecuencia necesarios para la alta fidelidad. Sin embargo, estos componentes de alta frecuencia en general son de amplitud más baja. Por ejemplo, los instrumentos musicales suelen generar sus señales a bajas frecuencias, pero contienen muchas armónicas de nivel inferior que les dan sonido único. Si es necesario preservar el sonido, entonces deberán hacerse pasar los componentes de alta frecuencia. Por ello los sistemas de sonido de alta fidelidad tienen un ancho de banda tan amplio. Puesto que estos componentes de alta frecuencia están en un nivel muy bajo, el ruido puede borrarlos.

Para resolver este problema, la mayoría de los sistemas de FM emplean una técnica llamada preénfasis, que permite contrarrestar la interferencia por ruido a alta frecuencia. En el transmisor, la señal

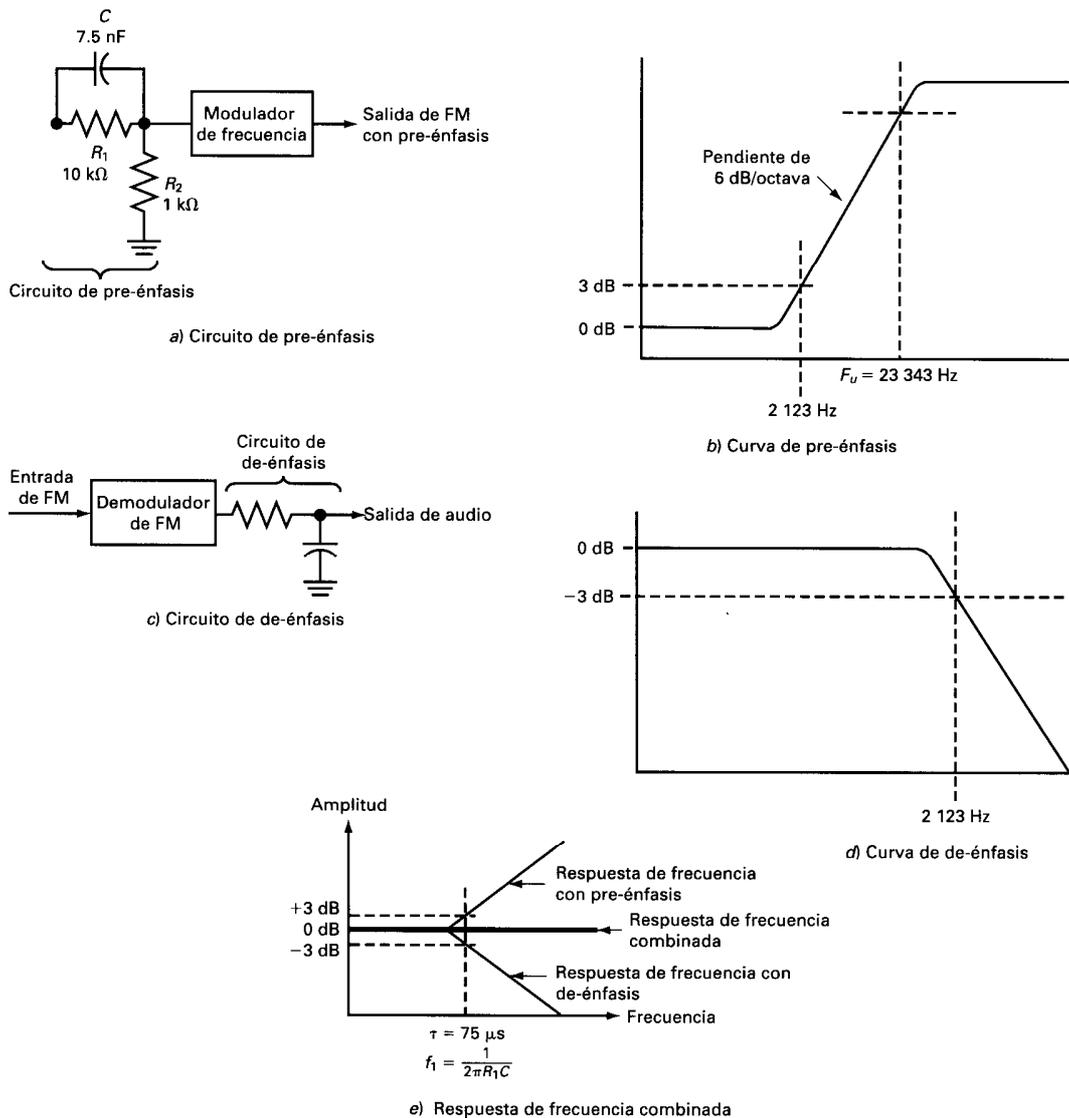


Figura 6-22 Pre-énfasis y de-énfasis.

moduladora se hace pasar por una red sencilla que amplifica más los componentes de alta frecuencia que los componentes de baja frecuencia. La forma más sencilla de este circuito es el filtro pasaaltos que ilustra la figura 6-22a). Las especificaciones establecen una *constante de tiempo*, t , de $75 \mu\text{s}$ (microseg), y $t = R_1 C$. Cualquier combinación de resistor y capacitor (o de resistor e inductor) que dé esta constante de tiempo será satisfactoria. Este circuito tiene una frecuencia de ruptura inferior, f_1 , de 2.123 Hz . Ello significa que frecuencias más altas que 2.123 Hz serán reforzadas linealmente. La amplitud de salida se incrementa con la frecuencia a razón de 6 dB por octava. La figura 4-8b) muestra la curva de preénfasis. Este circuito de preénfasis incrementa el contenido de energía de las señales de más alta frecuencia, de modo que tienden a hacerse más intensas que los componentes de ruido de alta frecuencia. Así mejora la razón de señal a ruido e incrementa la inteligibilidad y fidelidad.

El circuito de preénfasis también tiene una frecuencia de ruptura superior, f_u donde el refuerzo de la señal estabiliza horizontalmente (figura 6-14b). Esta frecuencia de ruptura superior se calcula con la fórmula

$$f_u = \frac{R_1 + R_2}{2\pi R_1 R_2 C}$$

En general se ajusta en un valor alto después del intervalo de audio. Una f_u mayor que 20 KHz . es típica.

Para regresar la respuesta de frecuencia a su nivel normal, se usa un circuito de-énfasis en el receptor. Se trata de un filtro pasabajos simple con una constante de tiempo de 75 microseg (figura 6-14c). Incluye un corte a 2.123 Hz y hace que las señales situadas por arriba de esta frecuencia se atenúen a razón de 6 dB por octava. La figura 6-14d) muestra la curva de respuesta. Como resultado, el pre-énfasis en el transmisor es compensado por el circuito de deénfasis en el receptor, produciendo una respuesta de frecuencia normal. El efecto combinado del preénfasis y de-énfasis consiste en incrementar los componentes de alta frecuencia durante la transmisión, de modo que tendrán una intensidad mayor y no estarán encubiertos por ruido.

Eficiencia de transmisión

La tercera ventaja de la FM sobre la AM se da en la eficiencia de transmisión. Recordemos que la modulación de amplitud puede producirse por técnicas de bajo y de alto nivel. La más eficaz es la modulación de alto nivel, en la que se utiliza un amplificador clase C como etapa de potencia final de RF, y es modulada por un amplificador modulador de alta potencia. El transmisor de AM debe producir una potencia de RF y de señal moduladora muy altas. Además, con niveles de potencia muy elevados no son prácticos los amplificadores de modulación grandes. En estas circunstancias, es necesario usar la modulación de bajo nivel. La señal de AM se desarrolla a un nivel bajo y después se amplifica con amplificadores lineales para producir la señal de RF final. Debido a que los amplificadores lineales operan en clase A o clase B, tienen una eficiencia mucho menor que los amplificadores clase C. Sin embargo, deben usarse amplificadores lineales para preservar la información de AM.

Una señal de FM tiene una amplitud constante y, por lo tanto, no es necesario usar amplificadores lineales para incrementar su potencia. De hecho, las señales de FM siempre se generan en un nivel bajo y después se amplifican mediante una serie de amplificadores clase C para incrementar su potencia. El resultado es el aprovechamiento más completo de la potencia disponible porque los amplificadores clase C son mucho más eficientes.

Desventaja de la modulación de frecuencia Quizás la principal desventaja de la FM es que utiliza bastante espacio espectral. El ancho de banda de una señal de FM es mucho mayor que el de una señal de AM que transmite información similar. Aun cuando es posible mantener bajo el índice de modulación para minimizar el ancho de banda utilizado, el ancho de banda sigue siendo más grande que el de una señal de AM. Asimismo, la reducción del índice de modulación abate también la inmunidad al ruido de la señal de FM. En los sistemas comerciales bidireccionales de radiocomunicación en FM, la desviación máxima permitida es de 5 kHz con una frecuencia moduladora máxima de 3 kHz. Esto produce una razón de desviación de $5/3 = 1.67$. Es común hacer referencia a esto como modulación de frecuencia de banda angosta (NBFM, narrow band FM).

Dada la magnitud del ancho de banda que ocupa la FM, típicamente se ha usado sólo en las muy altas frecuencias. De hecho, rara vez se utiliza en comunicaciones a frecuencias de menos de 30 MHz. La mayor parte del trabajo de comunicación en FM se hace en las frecuencias VHF, UHF y de microondas. Sólo en estos segmentos del espectro se tiene el ancho de banda adecuado para las señales de FM, donde predomina la transmisión en línea visual. Esto significa que el alcance de comunicación es más limitado.

REPASO

- ◆ 6-1. Defina *modulación angular*.
- ◆ 6-2. Defina *de FM directo* y *de FM indirecto*.
- ◆ 6-3. Defina *PM directo* y *PM indirecto*.
- ◆ 6-4. Defina *desviación de frecuencia* y *desviación de fase*.
- ◆ 6-5. Defina *fase instantánea*, *desviación de fase instantánea*, *frecuencia instantánea* y *desviación de frecuencia instantánea*.
- ◆ 6-6. Defina *sensitividad de desviación* para un modulador de frecuencia y para un modulador de fase.
- ◆ 6-7. Describa la relación entre la frecuencia de la portadora instantánea y la señal modulante para FM.
- ◆ 6-8. Describa la relación entre la fase de la portadora instantánea y la señal modulante para PM.
- ◆ 6-9. Describa la relación entre desviación de frecuencia y la amplitud y frecuencia de la señal modulante.
- ◆ 6-10. Defina *oscilación de la portadora*.
- ◆ 6-11. Defina *índice de modulación* para de FM y para PM.
- ◆ 6-12. Describa la relación entre índice de modulación y la señal modulante, para FM y para PM.

- ◆ 6-13. Defina porcentaje de modulación para las señales de modulación angular.
- ◆ 6-14. Describa la diferencia entre un modulador en frecuencia directo y un modulador en fase directo.
- ◆ 6-15. ¿Cómo puede convertirse un modulador en frecuencia a un modulador en fase; un modulador en fase a un modulador en frecuencia?
- ◆ 6-16. ¿Cuántos conjuntos de bandas laterales se producen cuando una portadora se modula, en frecuencia, por una sola frecuencia de entrada.
- ◆ 6-17. ¿Cuáles son los requerimientos para una frecuencia lateral que deben considerarse como significativas?
- ◆ 6-18. Defina índice de modulación *bajo, mediano y alto*.
- ◆ 6-19. Describa el significado de la tabla de *Bessel*.
- ◆ 6-20. Mencione la regla *general de Carson* para determinar el ancho de banda, para una onda de modulación angular.
- ◆ 6-21. Defina relación de desviación.
- ◆ 6-22. Describa la relación entre la potencia en la portadora no modulada y la potencia en la onda modulada para FM.
- ◆ 6-23. Describa la importancia del triángulo de ruido de FM.
- ◆ 6-24. ¿Qué efecto tiene la limitación sobre la forma de onda de FM compuesta?
- ◆ 6-25. Defina preénfasis y deénfasis.
- ◆ 6-26. Describa una red de preénfasis; una red de deénfasis.

RESUMEN

1. En FM, la señal de información hace variar la frecuencia de la portadora.
2. El cambio de frecuencia respecto de la frecuencia central de portadora, se llama desviación de frecuencia.
3. En FM, la desviación es proporcional a la amplitud de la señal moduladora.
4. Durante la FM, la amplitud de la portadora se mantiene constante.
5. Tanto la FM como la PM son tipos de modulación en ángulo.
6. En la modulación de fase, la amplitud de la señal moduladora hace variar el desfase de la portadora.
7. La modulación de fase produce modulación de frecuencia.
8. La FM producida por PM se denomina modulación de frecuencia indirecta.
9. La desviación de frecuencia máxima en una señal de PM ocurre cuando la rapidez de cambio de la amplitud de la señal moduladora es máxima, lo cual sucede en sus puntos de cruce por cero.
10. La desviación de frecuencia no se presenta en la salida de un modulador de fase, a menos que la amplitud de la señal moduladora esté variando.
11. La desviación de frecuencia producida por un modulador de fase se incrementa con la frecuencia moduladora.
12. Para producir una FM verdadera a partir de una señal de PM, la amplitud de la señal moduladora debe disminuirse con la frecuencia, de modo que la desviación de frecuencia no cambie con la frecuencia moduladora.
13. En la PM, un filtro pasabajos para la señal moduladora compensa la desviación de frecuencia incrementada a las frecuencias moduladoras más altas.
14. La modulación de frecuencia produce pares de bandas laterales espaciadas de la portadora en múltiplos de la frecuencia moduladora.
15. El índice de modulación, m , de una señal de FM es el cociente de la desviación de frecuencia, f_d , y la frecuencia moduladora, f_m ($m = f_d/f_m$).
16. La relación de desviación es la desviación de frecuencia máxima dividida entre la frecuencia moduladora máxima.
17. El índice de modulación determina el número de pares significativos de bandas laterales en una señal de FM.
18. Las amplitudes de la portadora y las bandas laterales varían con el índice de modulación y pueden calcularse con un procedimiento matemático denominada funciones de Bessel.
19. La amplitud de la portadora o de banda lateral es cero para algunos índices de modulación.
20. El ancho de banda de una señal de FM es proporcional al índice de modulación.
21. Hay dos maneras de calcular el ancho de banda de una señal de FM:
 $BW = 2Nf_m \text{ máx}$
 $BW = 2(f_{d\text{máx}} + f_{m\text{máx}})$
22. En la FM, el porcentaje de modulación es el cociente de la desviación de frecuencia real y la desviación de frecuencia máxima permitida, multiplicado por 100.

23. La principal ventaja de la FM sobre la AM es su inmunidad al ruido.
24. El ruido es la variación de amplitud de corta duración causada por la caída de rayos, funcionamiento de motores eléctricos, sistemas de ignición de automóviles, transitorios de potencia y otras fuentes.
25. Los circuitos limitadores en receptores de FM eliminan las señales de ruido.
26. Otra ventaja de la FM sobre la AM es el efecto de captura, el cual permite que la señal más intensa en una frecuencia predomine sin interferencia de la otra señal.
27. Una tercera ventaja de la modulación de frecuencia sobre la modulación de amplitud es la mayor eficiencia del transmisor, ya que pueden usarse amplificadores clase C.
28. Una desventaja importante de la FM es que su ancho de banda es mayor que el ancho de banda de la AM.
29. El espacio espectral que ocupa una señal de FM puede limitarse controlando con cuidado la razón de desviación.
30. Otra desventaja de la modulación de frecuencia es que los circuitos para producirla y demodularla suelen ser más complejos y costosos que los circuitos de AM.
31. El ruido ocurre principalmente en altas frecuencias; por lo tanto, hay mayor interferencia por el mismo en las frecuencias moduladoras altas.
32. La interferencia por ruido de alta frecuencia puede minimizarse reforzando la amplitud de las señales moduladoras de alta frecuencia antes de la modulación. Esto se llama pre-énfasis.
33. El pre-énfasis se lleva a cabo haciendo pasar la señal moduladora a través de una red RC que refuerza linealmente la amplitud de las frecuencias arriba de 2.123 Hz, en proporción al valor de la frecuencia. Con esto se incrementa la relación de señal a ruido en las frecuencias más altas.
34. El efecto de pre-énfasis se corrige en un receptor de FM por de-énfasis en las frecuencias altas al hacerlas pasar a través de un filtro pasabajos RC.
35. Las redes de pre-énfasis y de-énfasis tienen una constante de tiempo de 75 μs , y una frecuencia de corte de 2.123 Hz.
36. Una variante de la FM, llamado corrimiento de frecuencia por llaveo (FSK), se usa para transmitir datos digitales. Una entrada de 1 binario produce una frecuencia de portadora, y un 0 binario produce otra frecuencia de portadora en general más baja.
37. La modulación angular incluye la modulación de la frecuencia y de la fase, que están estrechamente relacionadas.
38. La FM se utiliza ampliamente para comunicaciones analógicas, en tanto que la PM tiene más expectativas en las comunicaciones de datos.
39. La potencia de una señal de modulación angular no cambia con la modulación, pero se incrementa el ancho de banda debido a la generación de varios conjuntos de bandas laterales.
40. El voltaje y la potencia de cada banda lateral se calcula por medio de las funciones de Bessel. Un ancho de banda aproximado se determina mediante la regla de Carson.
41. La FM tiene una ventaja importante en comparación con la AM en la presencia de ruido o interferencia, siempre que la desviación sea relativamente grande y la señal sea razonablemente fuerte o intensa.
42. El cociente S/N para FM se mejora considerablemente por medio de la preacentuación y la desacentuación, que da como resultado una mayor ganancia para las frecuencias de banda base más altas antes de la modulación, con una reducción correspondiente después de la desmodulación.
43. La transmisión FM estéreo se lleva a cabo por medio de un esquema de multiplexación que preserva la compatibilidad con los receptores monoaurales y requiere sólo un ligero incremento en el ancho de banda. Sin embargo, se paga un costo con ruido con la FM estéreo.
44. Un analizador de espectro es mucho más útil que un osciloscopio para el análisis de señales de FM. Éste puede utilizarse también para calibrar otro equipo de prueba de FM, como los medidores de desviación.

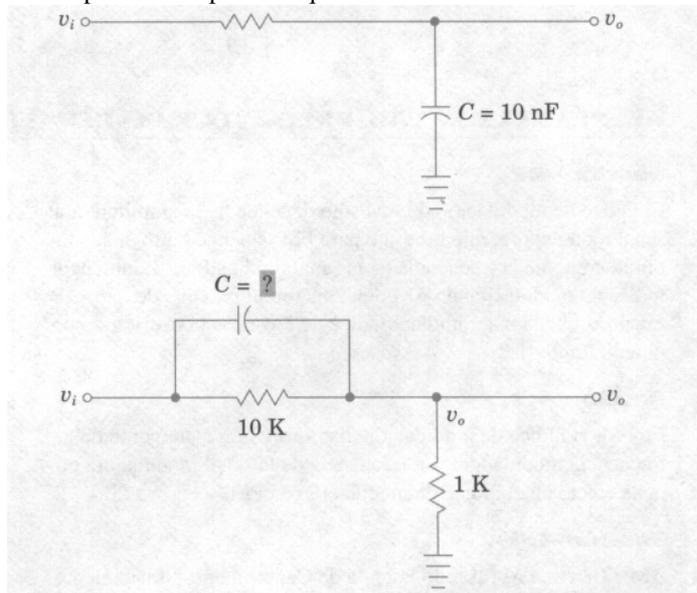
PROBLEMAS

- 6-1.** Si un modulador de frecuencia produce 5 kHz de desviación de frecuencia, para una señal modulante de 10 V, determine la sensibilidad de desviación. ¿Cuánta desviación de frecuencia se produce para una señal modulante de 2 V?
- 6-2.** Si un modulador de fase produce 2 rad de desviación de fase, para una señal modulante de 5 V, determine la sensibilidad de desviación. ¿Cuánta desviación de fase produciría una señal modulante de 2 V?

- 6-3.** Determine (a) la desviación de frecuencia pico, (b) la oscilación de la portadora y (c) el índice de modulación para un modulador de FM con sensibilidad de desviación $K_1 = 4 \text{ kHz/V}$ y una señal modulante $V_m(t) = 10 \text{ sen}(2\pi 2000t)$. ¿Cuál es la desviación de frecuencia pico producida si la señal modulante se duplicara en amplitud?
- 6-4.** Determine la desviación de fase pico para un modulador de PM con sensibilidad de desviación $K = 1.5 \text{ rad/V}$ y señal modulante $V_m(t) = 2 \text{ sen}(2\pi 2000t)$. ¿Cuánta desviación de fase se produce para una señal modulante con el doble de amplitud?
- 6-5.** Determine el porcentaje de modulación para una estación de radiodifusión de televisión, con una desviación de frecuencia máxima $\Delta f = 50 \text{ kHz}$, cuando la señal modulante produce 40 kHz de desviación de frecuencia en la antena. ¿Cuánta desviación se requiere para alcanzar 100% modulación de la portadora?
- 6-6.** De la tabla Bessel, determine el número de conjuntos de bandas laterales producidas para los siguientes índices de modulación: 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 y 10.0.
- 6-7.** Para un modulador de FM con un índice de modulación $m = 2$, la señal modulante $v_m(t) = V_m \text{ sen}(2\pi 2000t)$ y una portadora no modulada $v_c(t) = 8 \text{ sen}(2\pi 800kt)$:
- Determine el número de conjuntos de bandas laterales significativas.
 - Determine sus amplitudes.
 - Dibuje el espectro de frecuencia mostrando las amplitudes relativas de las frecuencias laterales.
 - Determine el ancho de banda.
 - Determine el ancho de banda si la amplitud de la señal modulante se incrementa por un factor de 2.5.
- 6-8.** Para un transmisor de FM con una oscilación de portadora de 60 kHz , determine la desviación de frecuencia. Si la amplitud de la señal modulante disminuye por un factor de 2, determine la nueva desviación de frecuencia.
- 6-9.** Para una señal de entrada dada, un transmisor de banda de radiodifusión de FM tiene una desviación de frecuencia $\Delta f = 20 \text{ kHz}$. Determine la desviación de frecuencia si la amplitud de la señal modulante se incrementa por un factor de 2.5.
- 6-10.** Un transmisor de FM tiene una frecuencia de reposo $f_c = 96 \text{ MHz}$ y una sensibilidad de $K_1 = 4 \text{ kHz/V}$. Determine la desviación de frecuencia para una señal modulante $v_m(t) = 8 \text{ sen}(2\pi 2000t)$. Determine el índice de modulación.
- 6-11.** Determine la relación de desviación y ancho de banda, en el peor de los casos, para una señal de FM con una desviación de frecuencia máxima $A f = 25 \text{ kHz}$ y una máxima señal modulante $f_{m(max)} = 12.5 \text{ kHz}$.
- 6-12.** Para un modulador de FM con una desviación de frecuencia de 40 kHz y una frecuencia de señal modulante $f_m = 10 \text{ kHz}$, determine el ancho de banda utilizando la tabla de Bessel y regla de Carson.
- 6-13.** Para un modulador de FM con una amplitud de portadora no modulada $V_c = 20 \text{ V}$, un índice de modulación $m = 1$ y un resistor de carga $R_L = 10 \Omega$, determine la potencia en la portadora modulada y cada frecuencia lateral y trace el espectro de potencia para la onda modulada.
- 6-14.** Para una portadora con modulación angular $v_c(t) = 2 \text{ cos}(2\pi 200 \text{ Mhz } t)$, con 50 kHz de desviación de frecuencia debido a la señal modulante y una señal de interferencia de frecuencia única $V_n(t) = 0.5 \text{ cos}(2\pi 200.01 \text{ Mhz } t)$, determine:
- La frecuencia de la señal de interferencia demodulada.
 - La desviación de frecuencia y de fase pico debida a la señal de interferencia. (c) La relación señal-a-ruido a la salida del demodulador.
- 6-15.** Determine la desviación de fase pico producida por una banda de 5 kHz de ruido aleatorio con un voltaje pico $V = 0.08 \text{ V}$ y una portadora $v_c(t) = 1.5 \text{ sen}(2\pi 40 \times 10^6 t)$
- 6-16.** Una señal de FM tiene una desviación de 10 kHz y una frecuencia moduladora de 2 kHz . Calcule el índice de modulación. Calcule la desviación de frecuencia de una señal de FM con una frecuencia moduladora de 5 kHz y un índice de modulación de 2.
- 6-17.** Una portadora de onda seno a 100 MHz se modula mediante una onda seno de 1 kHz . La desviación es de 100 kHz . Trace una gráfica que muestre la variación de la frecuencia de la señal con el tiempo.

- 6-18.** Un modulador de FM tiene una $k_f = 50$ kHz/V. Calcule la desviación y el índice de modulación para una señal moduladora de 3 kHz y 2 V (RMS).
- 6-19.** Cuando se aplica un voltaje positivo de cd de 5 V a un modulador de FM, su frecuencia de salida disminuye en 100 kHz. Calcule la sensibilidad de desviación del modulador.
- 6-20.** Una señal de 10 kHz modula una portadora de 500 MHz, con un índice de modulación de 2. ¿Cuáles son los valores máximo y mínimo de la frecuencia instantánea de la señal moduladora?
- 6-21.** Un modulador de fase con $k_p = 3$ rad/V es modulado por una onda seno con un voltaje RMS de 4 V a una frecuencia de 5 kHz. Calcule el índice de modulación de fase
- 6-22.** Una señal de PM tiene un índice de modulación de 2, con una señal moduladora que tiene una amplitud de 100 mV y una frecuencia de 4 kHz. ¿Cuál sería el efecto sobre el índice de modulación al:
- (a) cambiar la frecuencia a 5 kHz?
 - (b) cambiar el voltaje a 200 mV?
- 6-23.** Una onda seno con frecuencia de 1 kHz modula por fase una portadora a 123 MHz. La desviación de fase pico es de 0.5 rad. Calcule la desviación de frecuencia máxima.
- 6-24.** ¿Cuál es la desviación de fase máxima que puede presentarse en una señal de radiodifusión de FM, suponiendo que transmite un intervalo de frecuencia de banda base de 50 Hz a 15 kHz, con una desviación máxima de 75 kHz?
- 6-25.** Un sistema de modulación de fase opera con un índice de modulación de 1.5. ¿Cuál es el desfase máximo en grados?
- 6-26.** Una señal de FM utiliza una desviación de 100 kHz y una frecuencia moduladora de 25 kHz.
- (a) Calcule el índice de modulación.
 - (b) ¿Cuál es el ancho de banda predicho por la regla de Carson?
 - (c) Utilice las funciones de Bessel para hallar el ancho de banda de la señal ignorando las bandas laterales con una amplitud más de 40 dB debajo de la amplitud de la portadora no modulada.
- 6-27.** Si la potencia total de esta señal es de 10 W, ¿cuánta potencia se transmite a la frecuencia portadora para las condiciones descritas antes?
- 6-28.** Una señal de FM tiene una desviación de 10 kHz y es modulada por una onda seno con una frecuencia de 5 kHz. La frecuencia portadora es de 150 MHz y la señal tiene una potencia total de 12.5 W, operando con una impedancia de 50 ohms.
- (a) ¿Cuál es el índice de modulación?
 - (b) ¿Cuánta potencia hay a la frecuencia portadora?
 - (c) ¿Cuál es el nivel de voltaje de la segunda banda lateral a la izquierda de la frecuencia portadora?
 - (d) ¿Cuál es el ancho de banda de la señal, ignorando los componentes que tienen menos de 1% del voltaje de señal total?
- 6-29.** Un transmisor de FM opera con una potencia total de 10 W, una desviación de 5 kHz y un índice de modulación de 2.
- (a) ¿Cuál es la frecuencia moduladora?
 - (b) ¿Cuánta potencia se transmite a la frecuencia portadora?
 - (c) Si un receptor tiene un ancho de banda suficiente para incluir la portadora y los primeros dos pares de bandas laterales, ¿cuál es el porcentaje de la potencia de señal total que recibirá?
- 6-30.** Un transmisor de FM tiene una frecuencia portadora de 220 MHz. Su índice de modulación es de 3 con una frecuencia moduladora de 5 kHz. La potencia total de salida es de 100 W en una carga de 50 ohms.
- (a) ¿Cuál es la desviación?
 - (b) Trace el espectro de esta señal, incluyendo las bandas laterales con más de 1 % del voltaje de señal.
 - (c) ¿Cuál es el ancho de banda de esta señal, según el criterio utilizado en el inciso (b)?
 - (d) Por medio de la regla de Carson calcule el ancho de banda de esta señal y compárelo con el resultado obtenido en el inciso (c).
- 6-31.** Un transmisor de FM tiene una frecuencia portadora de 160 MHz. La desviación es de 10 kHz y la frecuencia moduladora es de 2 kHz. Un analizador de espectro muestra que la componente a la frecuencia portadora de la señal tiene una potencia de 5 W. ¿Cuál es la potencia de señal total?
- Por medio de la regla de Carson compare el ancho de banda que se requeriría para transmitir una señal en banda base con un intervalo de frecuencia de 300 Hz a 3 kHz usando:
- (a) NBFM con desviación máxima de 5 kHz
 - (b) WBFM con desviación máxima de 75 kHz
- 6-32.** Un receptor de FM opera con una relación S/N de 30 dB en su detector de entrada y con $m_f = 10$.
- (a) Si la señal recibida tiene un voltaje de 10 mV, ¿cuál es la amplitud del voltaje de ruido?
 - (b) Determine el desfase máximo que el voltaje del ruido podría dar a la señal.
 - (c) Calcule la S/N a la salida del detector, suponiendo que el detector es completamente insensible a variaciones de amplitud.
- 6-33.** Usando un circuito de preacentuación con una constante de tiempo de 75 μ s, ¿por aproximadamente cuánto, en decibeles, se reforzará una señal de 10 kHz comparada con una señal de 5 kHz?

6-34. Los circuitos mostrados en la figura siguiente son redes de preacentuación y desacentuación de 75 μ s. Identifíquelos y calcule los valores para los componentes que faltan.



Multiple choice

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

- 6-1. ¿A qué característica de la señal moduladora es proporcional la magnitud de la desviación de frecuencia respecto de la frecuencia central de portadora en un transmisor de FM?
- a) Amplitud. b) Frecuencia. c) Fase. d) Forma.
- 6-2. ¿De qué clase de modulación son tipos la FM y la PM?
- a) De amplitud. b) De fase. c) De ángulo. d) De ciclo de trabajo.
- 6-3. Si la amplitud de la señal moduladora se reduce, la desviación de la portadora
- a) Aumenta. b) Disminuye. c) Se mantiene constante. d) Se anula.
- 6-4. En una señal de FM, ¿en qué punto de la señal moduladora ocurre la desviación máxima?
- a) En los puntos de cruce en cero. b) En la amplitud pico positiva. c) En la amplitud pico negativa. d) b y c.
- 6-5. En la modulación de fase ocurre un corrimiento de frecuencia cuando la característica de la señal moduladora está cambiando.
- a) La forma. b) La fase. c) La frecuencia. d) La amplitud.
- 6-6. La desviación de frecuencia máxima de una señal de PM ocurre
- a) En los puntos de cruce en cero. b) En la amplitud pico positiva. c) En la amplitud pico negativa. d) En las amplitudes pico positiva y negativa.
- 6-7. En la PM, la desviación de frecuencia de la portadora no es proporcional a:
- a) La amplitud de la señal moduladora. b) La amplitud y la frecuencia de portadora. c) La frecuencia de la señal moduladora. d) El desfase en el modulador.
- 6-8. Para compensar los incrementos en la desviación de frecuencia de la portadora, con un incremento en la frecuencia de la señal moduladora, ¿qué circuito se usa entre la señal moduladora y el modulador de fase?
- a) Un filtro pasabajos. b) Un filtro pasaaltos. c) Un desfasador. d) Un filtro de pasabanda.
- 6-9. La FM producida por PM se llama a) FM. b) PM. c) Modulación de frecuencia indirecta. d) Modulación de fase indirecta.
- 6-10. Si la amplitud de la señal moduladora aplicada a un modulador de fase no varía, la señal de salida
- a) Será cero. b) Será igual a la frecuencia de la portadora. c) Estará por arriba de la frecuencia de la portadora. d) Estará por abajo de la frecuencia de la portadora.
- 6-11. Una portadora de 100 MHz se desvía 50 kHz por una señal de 4 kHz. El índice de modulación es
- a) 5. b) 8. c) 12.5. d) 20.
- 6-12. La desviación máxima de una portadora de FM es 2 kHz, la cual es producida por una señal moduladora máxima de 400 Hz. La razón de desviación es
- a) 0.2. b) 5. c) 8. d) 40.

- 6-13. Una portadora de 70 kHz tiene una desviación de frecuencia de 4 kHz con una señal de 1 000 Hz. ¿Cuántos pares de bandas laterales significativas se producen?
- a) 4.
b) 5. c) 6. d) 7.
- 6-14. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal de FM descrita en la pregunta 4-13?
- a) 4 kHz. b) 7 kHz. c) 14 kHz. d) 28 kHz.
- 6-15. ¿Cuál es la amplitud relativa del tercer par de bandas laterales de una señal de FM con $m = 6$?
- a) 0.11. b) 0.17. c) 0.24. d) 0.36.
- 6-16. Una portadora de 200 kHz es modulada por una señal de 2.5 kHz. El cuarto par de bandas laterales está separado de la portadora por
- a) 2.5 kHz. b) 5 kHz. c) 10 kHz. d) 15 kHz.
- 6-17. Un transmisor de FM tiene una desviación máxima de 12 kHz y una frecuencia moduladora máxima de 12 kHz. El ancho de banda por la regla de Carson es
- a) 24 kHz. b) 33.6 kHz. c) 36.8 kHz. d) 48 kHz.
- 6-18. La desviación máxima permitida de la señal de sonido de FM en televisión es 25 kHz. Si la desviación real es de 18 kHz, el porcentaje de modulación es
- a) 43%. b) 72%. c) 96%. d) 139%.
- 6-19. ¿Cuál de las siguientes no es una ventaja importante de la FM sobre la AM?
- a) Mayor eficiencia. b) Inmunidad al ruido. c) Efecto de captura.
d) Menor complejidad y costo.
- 6-20. La principal desventaja de la FM es su a) Mayor costo y complejidad.
b) Uso excesivo del espacio espectral. c) Susceptibilidad al ruido.
d) Menor eficiencia.
- 6-21. El ruido consiste principalmente en a) Puntas de alta frecuencia.
b) Variaciones de baja frecuencia. c) Cambios de nivel aleatorios.
d) Variaciones aleatorias de la frecuencia.
- 6-22. El circuito receptor que elimina el ruido de la FM es el a) Modulador.
b) Demodulador. c) Limitador.
d) Filtro pasabajos.
- 6-23. El fenómeno de una señal de FM intensa que domina una señal más débil en una frecuencia común se conoce como a) Efecto de captura. b) Aplastamiento.
c) Factor de silenciamiento. d) Síndrome de dominación.
- 6-24. Las señales de AM generadas en un nivel bajo sólo pueden amplificarse con un amplificador a) Operacional.
b) Lineal.
c) Clase C.
d) De contrafase.
- 6-25. Los transmisores de modulación de frecuencia son más eficientes porque su potencia se incrementa con amplificadores a) Clase A. b) Clase B. c) Clase C. d) Todos los anteriores.
- 6-26. El ruido interfiere principalmente señales moduladoras que son a) Senoidales. b) No senoidales. c) De baja frecuencia. d) De alta frecuencia.
- 6-27. Las frecuencias moduladoras que refuerzan circuitos de pre-énfasis antes de la modulación son a) Altas frecuencias.
b) Frecuencias de intervalo medio.
c) Bajas frecuencias.
d) Todas las anteriores.
- 6-28. Un circuito de pre-énfasis es un a) Filtro pasabajos.
b) Filtro pasaaltos. c) Desfasador.
d) Desfasamiento de pasabanda.
- 6-29. El pre-énfasis se compensa en el receptor por un a) Invertidor de fase.
b) Filtro pasabanda.
c) Filtro pasaaltos.
d) Filtro pasabajos.