

# MODULACIÓN ANALÓGICA EN FRECUENCIA

La FM se consideró muy al principio del desarrollo de las radiocomunicaciones. Inicialmente, se pensó que la FM podría permitir un ancho de banda de transmisión reducido en comparación con la AM. En 1922 John Renshaw Carson (1887-1940) refutó lo anterior mediante pruebas experimentales y también con cálculos matemáticos.

Carson no observó que la FM tenga una ventaja sobre la AM en términos de la relación señal a ruido. Edwin Armstrong (sí, el mismo Armstrong que inventó el receptor superheterodino) observó lo anterior, y en 1936 propuso un sistema práctico de FM. La radiodifusión en FM comenzó en Estados Unidos en 1939, pero experimentó un retroceso en 1944 cuando su asignación de frecuencia de 42 a 50 MHz se desplazó de manera abrupta a su intervalo actual de 88 a 108 MHz. La radiodifusión en FM poco a poco se hizo popular, gracias a sus ventajas con respecto al ruido y a la fidelidad sobre la AM. En la actualidad hay más radioescuchas de FM que de AM.

Sin embargo, Armstrong no se benefició del éxito de la radiodifusión en FM. Se pasó el resto de su vida involucrado en juicios legales en un intento por recibir regalías por sus inventos y, finalmente, destrozado, se suicidó en 1954.

En una señal analógica pueden variar tres propiedades: la amplitud, la frecuencia y la fase. Anteriormente tratamos sobre la modulación en amplitud. Este texto, trataremos sobre la *modulación en frecuencia (FM)* y la *modulación en fase (PM)*. La modulación en frecuencia y en fase, son ambas formas de la *modulación angular*. Desdichadamente, a ambas formas de la modulación angular se les llama simplemente FM cuando, en realidad, existe una diferencia clara (aunque sutil), entre las dos. Existen varias ventajas en utilizar la modulación angular en vez de la modulación en amplitud, tal como la reducción de ruido, la fidelidad mejorada del sistema y el uso más eficiente de la potencia. Sin embargo, FM y PM, tienen varias desventajas importantes, las cuales incluyen requerir un ancho de banda extendida y circuitos más complejos, tanto en el transmisor, como en el receptor.

La modulación angular fue introducida primero en 1931, como una alternativa a la modulación en amplitud. Se sugirió que la onda con modulación angular era menos susceptible al ruido que AM y, consecuentemente, podía mejorar el rendimiento de las comunicaciones de radio. El mayor E. H. Armstrong desarrolló el primer sistema de radio de FM con éxito, en 1936 (quien también desarrolló el receptor superheterodino) y, en julio de 1939, la primera radiodifusión de señales de FM programada regularmente comenzó en Alpine, New Jersey. Actualmente, la modulación angular se usa extensamente para la radiodifusión de radio comercial, transmisión de sonido de televisión, radio móvil de dos sentidos, radio celular y los sistemas de comunicaciones por microondas y satélite.

Los propósitos de este texto, son introducir a los conceptos básicos de la modulación en frecuencia y en fase y cómo se relacionan uno con otro, mostrar algunos de los circuitos más usados comúnmente para producir las ondas con modulación angular y comparar el rendimiento de la modulación angular con la modulación en amplitud.

Tanto la modulación de frecuencia (FM) como la modulación de fase (PM) se utilizan mucho en sistemas de comunicación. La FM es más familiar en la vida cotidiana, puesto que se utiliza de forma extensa para la radiodifusión. La FM se utiliza también para la señal de sonido en la televisión, para sistemas de radio bidireccionales fijos y móviles, para comunicaciones por satélite y para sistemas de telefonía celular, por nombrar sólo algunas de sus aplicaciones más comunes.

Aunque la PM es menos familiar, se utiliza mucho en comunicaciones de datos. También se utiliza en algunos transmisores de FM como un paso intermedio en la generación de FM. La FM y la PM están estrechamente relacionadas desde el punto de vista matemático, y es muy fácil cambiar de una a la otra.

La ventaja más importante de la FM o de la PM sobre la AM es la posibilidad de una relación señal a ruido bastante mejorada. En contraposición a la AM, la amplitud y la potencia de una señal FM o PM no cambian con la modulación. Por consiguiente, la señal FM no tiene una envolvente que reproduzca la modulación. Esto en realidad es una ventaja: un receptor de FM no tiene que responder ante las variaciones de amplitud y, por lo tanto, ignora el ruido hasta cierto grado. De manera similar, con los transmisores de FM se pueden utilizar amplificadores Clase C, puesto que no es importante la linealidad de la amplitud. La modulación puede llevarse a cabo a niveles bajos de potencia.

La *modulación angular* resulta cuando el ángulo de fase ( $\theta$ ), de una onda sinusoidal, varía con respecto al tiempo sin tocar los otros parámetros. La onda con modulación angular se muestra matemáticamente como:

$$e(t) = E_c \cos [\omega_c t + \theta(t)]$$

En donde  $e(t)$  = onda con modulación angular;  
 $E_c$  = amplitud pico de la portadora (voltios)  
 $\omega_c$  = frecuencia en radianes de la portadora (es decir velocidad angular,  $2\pi f_c(t)$ )  
 $\theta(t)$  = desviación instantánea de fase (radianes)

Con la modulación angular, es necesario que  $\theta(t)$  sea una función de la señal modulante. Por lo tanto, si  $v_m(t)$  es la señal modulante, la modulación angular se muestra matemáticamente como:

$$\theta(t) = f[e_m(t)]$$

En donde  $e_m(t) = E_m \text{sen}(\omega_m t)$   
 $\omega_m$  = velocidad angular de la señal modulante (radianes/segundo)  
 $f_m$  = frecuencia de la señal modulante (hertz)  
 $E_m$  = amplitud pico de la señal modulante (voltios)

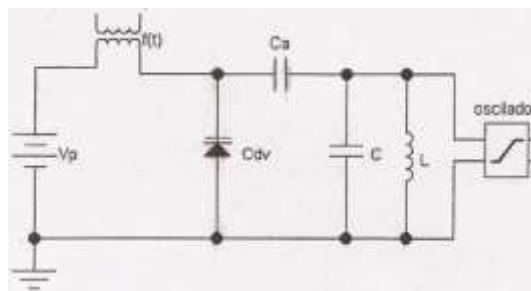
En esencia, la diferencia entre la modulación en frecuencia y en fase está en cuál propiedad de la portadora (la frecuencia o la fase) está variando directamente por la señal modulante y cuál propiedad está variando indirectamente. Siempre que la frecuencia de la portadora está variando, la fase también se encuentra variando, y viceversa. Por lo tanto, FM y PM, deben ocurrir cuando se realiza cualquiera de las formas de la modulación angular. Si la frecuencia instantánea de la portadora varía directamente de acuerdo con la señal modulante, resulta en una señal de FM. Si la fase de la portadora varía directamente de acuerdo con la señal modulante, resulta en una señal PM. Por lo tanto, la FM directa es la PM indirecta y la PM directa es la FM indirecta. La modulación en frecuencia y en fase pueden definirse de la siguiente manera:

*Modulación en frecuencia* directa (FM): variando la frecuencia de la portadora de amplitud constante directamente proporcional, a la amplitud de la señal modulante, con una velocidad igual a la frecuencia de la señal modulante.

*Modulación en fase* directa (PM): variando la fase de una portadora con amplitud constante directamente proporcional, a la amplitud de la señal modulante, con una velocidad igual a la frecuencia de la señal modulante.

A efectos de simplificar la interpretación de la técnica se analiza de manera genérica el concepto de FM, con la ayuda de un circuito simple y luego se profundizara su estudio.

En esta técnica mediante la amplitud de la banda base se varía la frecuencia de la portadora. Esto se puede lograr aplicando señal modulante a un varactor. En la siguiente figura se presenta dicho circuito típico:

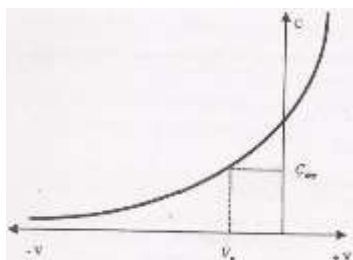


La capacidad total equivalente  $C_T$ , vista a los bornes del inductor L es:  $C_T = C // (C_a \text{ en serie con } C_{dv})$

La frecuencia de oscilación del oscilador está fijada el tanque resonante  $L//C_T$  de donde la frecuencia de oscilación será:

$$f_{oscilación} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C_T}}$$

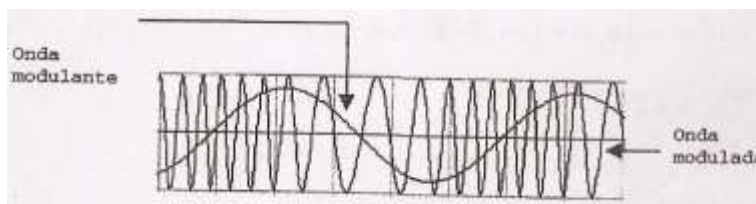
La tensión de polarización  $V_p$  fija la capacidad del varactor y luego la  $f(t)$  se suma o se resta a esta polarización, variando la capacidad equivalente  $C_t$ , lo que varía la frecuencia de salida. De tal manera que la frecuencia de salida varía según la amplitud de la señal modulante. En la siguiente figura se observa la curva de capacidad vs. Tensión, de un varactor.



La capacidad fijada por la tensión de polarización  $V_p$  la denominamos  $C_{dvp}$  y cuando esta tensión de polarización varía, la capacidad sigue la siguiente ley:

$$C = \frac{C_{dvp}}{\sqrt{1 + 2V}}$$

La desviación en frecuencia es función de la amplitud de la señal modulante. Si la desviación máxima y mínima de la frecuencia de portadora se la mantiene constante, la modulación en frecuencia queda entonces en la cantidad de veces que se desvíe la portadora. De tal manera que la desviación será función de la amplitud de la modulante y la cantidad de veces que se desvíe es función de la frecuencia de la modulante. De donde la modulación en frecuencia está en la cantidad de veces que se desvíe la portadora. La siguiente figura muestra una señal modulada en frecuencia, a partir de una onda periódica senoidal, que se ha colocado superpuesta a efectos de visualizar el efecto de la señal modulada.



### La fase y la frecuencia modulada

A diferencia de lo que ocurre en la transmisión de AM, en el proceso de Modulación Angular, la envolvente de la señal de RF permanece constante mientras lo que varía es la **Frecuencia Instantánea**.

Suponemos tener una portadora del tipo

$$e_c = E_c \cos(\omega_c t + \phi) = E_c \cos\theta$$

Se define la *Frecuencia Angular Instantánea*

$$\omega_i = \frac{d\theta}{dt}$$

Se elige adecuadamente el origen  $t=0$ , se puede hacer que  $\phi=0$ , entonces se tendrá

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_c \text{ (sin modulación, la portadora sola)}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_c + K E_m \text{ sen } \omega_m t \text{ (con modulación)}$$

Al observar en las fórmulas que la portadora instantánea se ve afectada por una señal modulante, porque  $\phi$  de la expresión de la portadora es ahora una función variable con el tiempo.

$$e_m(t) = E_m \cos \omega_m t$$

Como la portadora se va a desviar proporcionalmente al nivel de amplitud de la modulante, se define ahora una desviación máxima de frecuencia:

$$\Delta\omega = K E_m \text{ tambien } \Delta f = \frac{K E_m}{2\pi}$$

Se concluye entonces que la desviación o cambio de frecuencia instantánea provocada por la modulante es únicamente función de la *Amplitud de la Señal de Audio*. Esta variación de frecuencia se realizará con una *velocidad* proporcional a la frecuencia de la señal modulante.

Como:

$$\omega_i = \frac{d\theta}{dt}$$

Retornando integrando llegamos a:

$$\theta(t) = \omega_c t - \frac{K E_m}{\omega_m} \cos \omega_m t + C$$

Si se elimina la constante C con una conveniente elección del tiempo. La expresión para una onda modulada en frecuencia será entonces:

$$\phi_{FM}(t) = E_c \text{ SEN} \left[ \omega_c t - \frac{K E_m}{\omega_m} \cos \omega_m t \right]$$

Y en una forma más general:

$$\phi_{FM}(t) = E_c \text{ SEN} \left[ \omega_c t + K \int f_m(t) dt \right]$$

Donde  $f_m(t)$  es la señal modulante. La ecuación anterior representa la expresión general de una modulada en frecuencia por una banda base no periódica.

Como conclusión se puede establecer que para que se genere FM se puede usar 2 métodos:

1. Modificar directamente la frecuencia de la portadora (oscilador) proporcionalmente a las variaciones de amplitud de la modulante.
2. Trabajar sobre la **fase** de la portadora (aparte del oscilador) con la integral de la señal modulante.

Aquí también se define el *índice de modulación*.

$$m_f = \frac{K E_m}{\omega_m} = \frac{\Delta\omega_{\text{máx}}}{\omega_m} = \frac{2\pi\Delta f_c}{2\pi f_m} = \frac{\Delta f_c}{f_m}$$

Luego, la expresión general nos quedará

$$\phi_{FM}(t) = E_c \text{ SEN} \left[ \omega_c t - m_f \cos \omega_m t \right]$$

### **FM. Enfoque periódico**

Si se analiza esta modulación, ahora con un enfoque periódico, es decir la señal modulante será un tono senoidal.

$$e_m(t) = E_m \text{ Sen} \omega_m t$$

Tomando como portadora

$$e_c(t) = E_c \text{Sen} \omega_c t$$

Por lo expuesto anteriormente, se puede armar la expresión de la señal modulada como resultante de una portadora cuya fase varía de manera instantánea.

$$\phi_{FM} = E_c \text{Sen} \theta_i$$

Donde la derivada de la fase instantánea es la frecuencia angular instantánea.

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i = \omega_c + K_v \cdot E_m \text{Sen} \omega_m t = \omega_c + \Delta \omega_c \text{Sen} \omega_m t$$

El producto  $K_v \cdot E_m$ , representa la desviación en frecuencia ya que esta es resultado de la amplitud de la modulante. El valor de  $K_v$ , depende del diseño del modulador y las unidades en que se expresa es de  $\frac{\text{radian}/\text{seg}}{\text{Voltio}}$  o  $\frac{\text{Hz}}{\text{Voltio}}$  según sea la unidad que estemos utilizando para medir la desviación de frecuencia. Para obtener la fase instantánea se integra la ecuación descrita anteriormente y definiendo el índice de modulación en frecuencia  $m_f$ , nos queda:

$$\theta_i = \int \omega_i dt = \int \omega_c dt + \int \Delta \omega_c \text{Sen} \omega_m t dt = \omega_c t - m_f \text{Cos} \omega_m t$$

Relacionando ambas expresiones anteriores obtenemos:

$$\phi_{FM} = E_c \text{Sen}(\omega_c t - m_f \text{Cos} \omega_m t)$$

$$\phi_{FM} = E_c [\text{Sen} \omega_c t \text{Cos}(m_f \text{Cos} \omega_m t) - \text{Cos} \omega_c t \text{Sen}(m_f \text{Cos} \omega_m t)]$$

Cada uno de los términos se puede resolver como series trigonométricas de coeficientes variables lo que implica que deben ser desarrolladas por Bessel, cuya expresión es la siguiente:

$$\text{Cos}(m_f \text{Cos} \omega_m t) = J_0(m_f) - 2J_2(m_f) \text{Cos} 2\omega_m t + 2J_4(m_f) \text{Cos} 4\omega_m t \dots\dots\dots$$

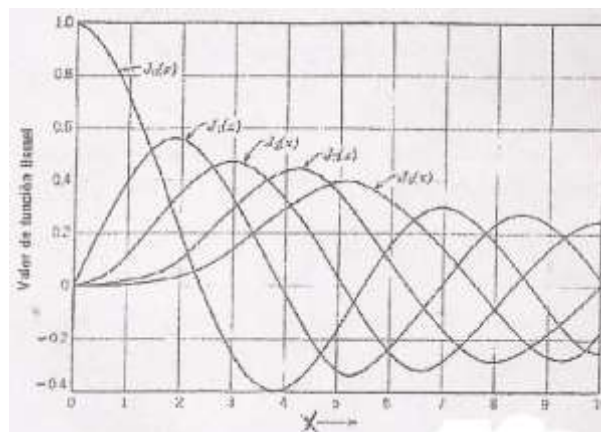
$$\text{Sen}(m_f \text{Cos} \omega_m t) = 2J_1(m_f) \text{Cos} \omega_m t - 2J_3(m_f) \text{Cos} 3\omega_m t \dots\dots\dots$$

Por lo que la expresión de FM se puede escribir como:

$$\phi_{FM} = E_c [ J_0(m_f) \text{Sen} \omega_c t - J_1(m_f) \text{Cos}(\omega_c \pm \omega_m)t - J_2(m_f) \text{Sen}(\omega_c \pm 2\omega_m t) + j_3(m_f) \text{Cos}(\omega_c \pm 3\omega_m t) + j_4(m_f) \text{Sen}(\omega_c \pm 4\omega_m t) \dots\dots\dots ]$$

La señal modulada en FM, está formada por bandas laterales armónicas de la banda base cuyas amplitudes son variables según los coeficientes de Bessel. Estos coeficientes dependen del índice de modulación  $m_f$ .

La siguiente figura muestra los valores de los coeficientes en función del índice de modulación, donde en el eje y se obtiene la amplitud de los coeficientes y en el eje horizontal el índice.



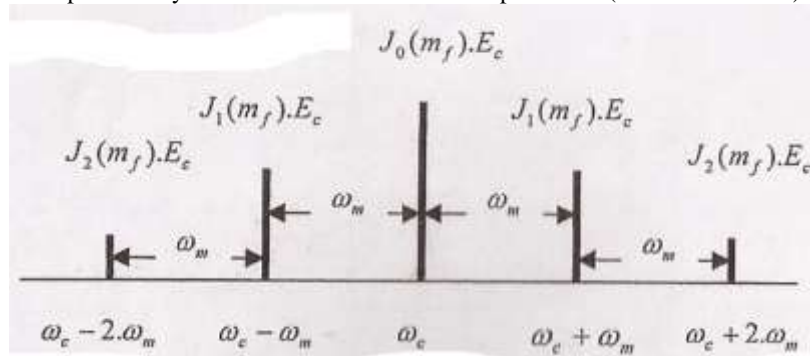
Al analizar el gráfico se puede observar que cuando el índice es pequeño hay pocas bandas laterales y viceversa. Si se mantiene constante la máxima amplitud de la señal modulante, la desviación de frecuencia será constante, pero como la frecuencia de la señal modulante es variable, esto implica que el índice es variable.

En la siguiente figura se representa una tabla de valores de coeficientes de Bessel según  $m_f$ .

$m_f$	$J_0$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	$J_9$	$J_{10}$
0	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	0,98	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5	0,94	0,24	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0,77	0,44	0,11	0,02	-	-	-	-	-	-	-
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01	-	-	-	-	-	-
2	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03	-	-	-	-	-	-
2,4	0	0,52	0,43	0,2	0,06	0,02	-	-	-	-	-
2,5	-0,05	0,5	0,45	0,22	0,07	0,02	0,01	-	-	-	-
3	-0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01	-	-	-	-
4	-0,4	-0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02	-	-	-
5	-0,18	-0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02	-	-
6	0,15	-0,28	-0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02	-
7	0,3	0	-0,3	-0,17	0,16	0,35	0,34	0,23	0,13	0,06	0,02

La señal modulada desde el punto de vista del espectro resulta ser una onda con muchas bandas laterales cuyas amplitudes dependen de los coeficientes de Bessel y la distancia entre las bandas es la frecuencia de la modulante.

El espectro resultante es de líneas armónicas a la banda base. Esto puede observarse en el siguiente gráfico donde se representa una portadora y dos pares de bandas laterales armónicas. Donde además las amplitudes están en función del producto de la amplitud de la portadora y el coeficiente de Bessel correspondiente (valores absolutos).



La distancia entre las bandas laterales está fijada por la frecuencia del tono modulante y la cantidad de bandas es función del índice de modulación. Esto significa que el ancho de banda de una señal modulada en FM se deberá calcular en función de las bandas laterales que tenga.

### Cálculo del ancho de banda

En 1922, Carson en un estudio matemático demostró que una señal de FM, no puede acomodarse en un ancho menor que una AM.

Vista la característica de la señal modulada en frecuencia, es muy razonable pensar que hacen falta todas las bandas laterales para recuperar la banda base.

De tal manera surge una pregunta fundamental: ¿Cuántas bandas laterales son necesarias para recuperar de manera razonable la información original? Como las bandas laterales están separadas entre sí por la frecuencia modulante, para una señal periódica, se puede expresar en ancho de banda en FM como:

$$B_{FM} = 2.n.f_m = 2.n.B$$

Donde  $n$  es el número de bandas laterales significativas y  $f_m$ , la frecuencia de la señal modulante. Cuando se trata de una banda base, tomamos como la máxima frecuencia a transmitir como el ancho de banda  $B$ .

Son muchos los criterios para calcular a n. Atento al hecho de que el índice de modulación es variable y si pasan las altas frecuencias las bajas seguramente pasaran, una buena aproximación suele ser tomar un criterio propuesto por Carson:

$$n = m_f + 1$$

Donde  $m_f$  es el índice de modulación más chico, es decir el que corresponde a la frecuencia modulante más alta o el ancho de banda base, donde se obtiene:

$$B_{FM} = 2.(m_f + 1).f_m = 2.(m_f + 1).B = 2.(\Delta f_c + B)$$

Esta expresión denominada la regla de Carson, ocupa un ancho de banda menor que el que se calcularía utilizando los términos de Bessel. Pero Carson la propuso porque esta regla se transmite más del 95% de la potencia total que se transmitiría con Bessel. Es decir casi se transmite la totalidad de la potencia y se achica el ancho de banda de la señal modulada de manera considerable.

### **Análisis de la potencia de una señal de FM**

La potencia de una señal modulada en FM, es igual a la potencia de la portadora no modulada. Es decir las bandas laterales no aportan energía como en el caso de la AM.

Esto implica que la potencia es constante y cuando no modula esta toda en la portadora y cuando lo hace se distribuye en bandas laterales.

La potencia total se la podría calcular cuando no modula como:

$$P_{TFM} = \frac{E_c^2}{2.Z_L}$$

La potencia de la portadora se calcula:

$$P_c = \frac{[J_0(m_f).E_c]^2}{2.Z_L}$$

Por lo que se puede decir lo siguiente:

$$P_c = P_{TFM} \cdot J_0^2(m_f)$$

Tal como se observa en la expresión anterior se distribuye la potencia total en la portadora. La potencia de las 2 primeras bandas laterales:

$$P_{2BL1} = \frac{[J_1(m_f).E_c]^2}{Z_L}$$

Y por lo tanto la potencia de las dos enésimas bandas laterales

$$P_{2BLn} = \frac{[J_n(m_f).E_c]^2}{Z_L} = 2.P_{TFM} \cdot J_n^2(m_f)$$

Por lo que la expresión de la potencia total podrá estar representada de la siguiente manera:

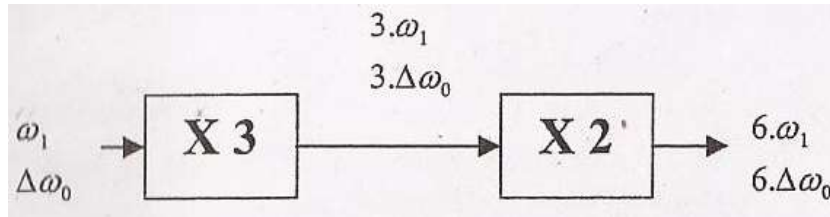
$$P_{TFM} = P_{TFM} \left[ J_0^2(m_f) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n^2(m_f) \right]$$

En el momento que no modula la sumatoria es cero, el valor de  $J_0(m_f)$  es uno y toda la potencia está en la portadora.

### **Un aspecto importante en la generación de FM**

Uno de los aspectos importantes en la generación de la señal modulada en FM es el hecho de que se puede partir de portadoras y desviaciones muy bajas y con sucesivas multiplicaciones se puede lograr las condiciones de diseño. Esto es ventajoso para el diseño puesto que no se puede lograr grandes desviaciones en zona lineal con los diodos varactores.

Analizando el diagrama de la siguiente figura que está formado por 2 multiplicadores primero por 3 y luego por 2. A la cual ingresa una portadora de frecuencia  $\omega_1$  y desviación de frecuencia  $\Delta\omega_0$



La salida de la portadora y de la desviación de frecuencia es ahora de seis veces mayor, mientras que la señal modulante es la misma.

Con la adecuada elección de valores se logra trabajar grandes frecuencias de portadoras y desviaciones partiendo de valores muy bajos.

**Detección de FM**

A efectos de recuperar la banda base, se trata de lograr una transferencia lineal amplitud vs. Frecuencia y luego detectar convencionalmente. Variaciones de frecuencia en amplitud, el aspecto más sencillo es derivar idealmente la señal de FM. Tomando la expresión de FM y derivándola con respecto al tiempo, nos queda:

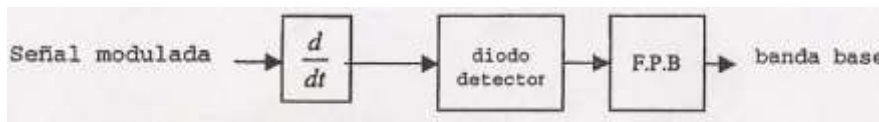
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \phi_{FM} &= \frac{d}{dt} E_c \text{Sen} \left[ \omega_c t + K_f \int f(t) dt \right] = E_c \left[ \omega_c + K_f f(t) \right] \text{Cos} \left[ \omega_c t + K_f \int f(t) dt \right] = \\ &= \omega_c E_c \left[ 1 + \frac{K_f}{\omega_c} f(t) \right] \cdot \text{Cos} \left[ \omega_c t + K_f \int f(t) dt \right] \end{aligned}$$

La expresión anterior es una señal de AM, cuya envuelta es

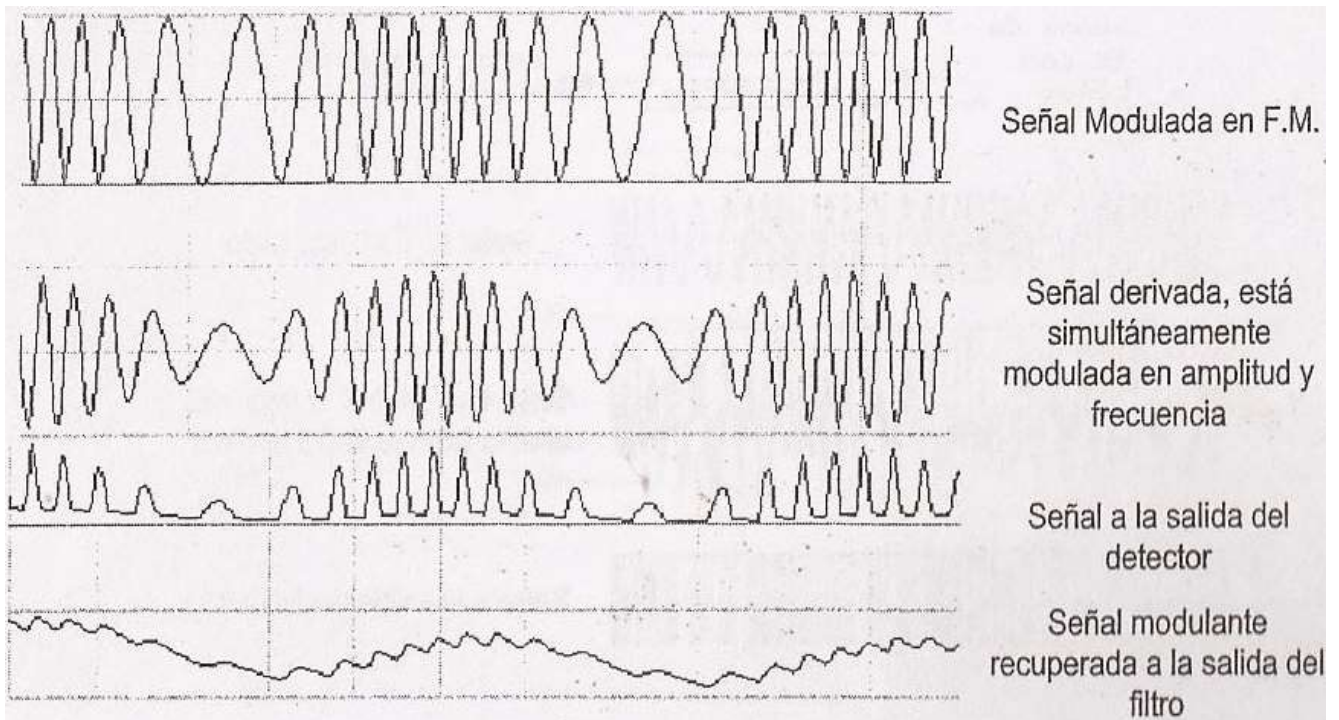
$$E_c \omega_c \left[ 1 + \frac{K_f}{\omega_c} \cdot f(t) \right].$$

Sería una señal de amplitud variable según la banda base y cuya portadora tiene una desviación de frecuencia. Luego de la derivación un simple detector de envuelta puede recuperar la banda base.

En la siguiente figura se representa el diagrama en cajas con la derivación y la detección de la señal modulada.



El análisis temporal en todos los puntos del diagrama propuesto se puede observar en la siguiente imagen:



## ACTIVIDADES

- 1) Dada las siguientes señales determinar las fases y frecuencias instantáneas

a)  $10\cos(200\pi + \frac{\pi}{3})$

b)  $10\cos(20\pi + \frac{\pi}{3})$

- 2) Una señal modulante  $e_m(t) = E_m \text{Sen } 2.\pi .10^3 t$ , modula a una portadora senoidal de amplitud 20V y 1MHz de frecuencia, con un índice de modulación de 1. Determinar:

- La desviación de frecuencia.
  - La expresión de la onda modulada.
  - La gráfica en frecuencia de la señal modulada.
  - El ancho de banda tomando todas las componentes de Bessel.
  - La potencia total transmitida.
  - El ancho de banda utilizando la regla de Carson.
  - La potencia total para la consigna anterior.
- 3) Un tono senoidal de 10KHz y 20V de amplitud, modula a una portadora senoidal de 100KHz, cuya amplitud es de 20V. El coeficiente de diseño del modulador es  $1 \frac{\text{KHZ}}{\text{voltio}}$ . Sabiendo que el sistema carga sobre una impedancia de 50Ω. Determinar:
- La expresión de la modulante.
  - La expresión de la portadora.
  - La desviación en frecuencia.
  - El índice de modulación.
  - El valor máximo y mínimo de frecuencia a la que llega la portadora.
  - La expresión de la onda modulada.
  - La potencia total.
  - El ancho de banda de la señal modulada por Bessel.
  - El ancho de banda de la señal modulada utilizando la regla de Carson.
  - Una comparación de potencia transmitida utilizando los anchos de banda de las consignas h e i.
- 4) Una onda senoidal de 5V de amplitud y frecuencia 10KHz, modula a una portadora de 100MHz y 10V de amplitud. La desviación de frecuencia es de 40KHz. Sabiendo que el sistema carga sobre una impedancia de 50Ω. Determinar:
- La expresión de la modulante.
  - La expresión de la portadora.
  - El índice de modulación.
  - La expresión de la onda modulada, con los coeficientes de Bessel.
  - La potencia de portadora.
  - La potencia total.
- 5) Una señal de FM tiene una desviación de frecuencia de 3KHz y una frecuencia moduladora de 1KHz. Su potencia total es 5W desarrollada sobre una carga resistiva de 50ohms. La frecuencia de la portadora es de 160Mhz. Determinar:
- El voltaje de señal rms de la portadora.
  - El indice de modulacion.
  - El voltaje rms a la frecuencia de la portadora y cada una de los tres primeros pares de bandas laterales.

## 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. 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.
- 6-6. La FM producida por PM se llama:
- a) FM. b) PM. c) Modulación de frecuencia indirecta. d) Modulación de fase indirecta.
- 6-7. 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.
- 6-8. 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.
- 6-9. ¿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.
- 6-10. ¿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.
- 6-11. 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.