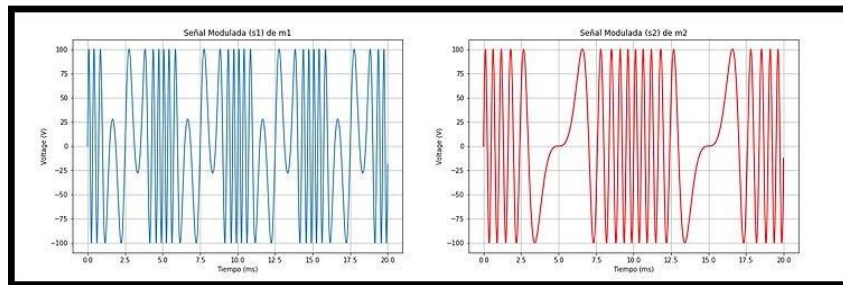


## CAPITULO IV

**Objetivo:** Controlar y analizar las definiciones con respecto a la modulación y demodulación de fase y frecuencia



### Introducción

En los siguientes organizadores gráficos, se propone un recorrido por el extenso mundo de las comunicaciones, pretendiendo ser, una suma de conocimiento para estudiantes y docentes. Su propósito es constituirse como un documento pedagógico, con carácter general y universal, para el desarrollo de conocimientos futuros, los cuales pueden ser profundizados en otros libros de texto. Como aporte interesante se presentan los apéndices de problemas resueltos y propuestos. Apéndices que han incluido problemas sencillos pero didácticos, que conducen más a la reflexión que la aclaratoria en el apartado de ejercicios. (Romero, 2013)

### MODULACIÓN POR FRECUENCIA ANALÓGICA FM

#### CARACTERÍSTICAS

- El primer sistema operativo de comunicación de radio de FM fue desarrollado con éxito por el mayor Edwin H. Armstrong en 1936, con un receptor superheterodino (amplificador de RF que utiliza el proceso de mezcla de frecuencias o heterodinación para convertir las señales de Rx en una frecuencia intermedia fija).[1]
- FM fue elegida como la norma de modulación para las transmisiones radiofónicas de alta fidelidad.
- Transmite en un canal de la banda de 88 a 108 MHz
- Transmite la onda sonora mediante variaciones en su frecuencia (velocidad), mientras que la amplitud permanece constante.
- Conserva las características originales de los sonidos y elimina las interferencias que pueden causar estática: tormentas eléctricas, ruidos ambientales o el funcionamiento de otras fuentes eléctricas o

electrónicas.[2]

- Apenas le afectan las interferencias y descargas estáticas.

### **DESVENTAJAS**

- Utiliza ondas muy cortas y direccionales cuya propagación se interrumpe con cualquier obstáculo (edificios altos, montañas).
- Sus ondas poseen un alcance muy limitado, lo que las convierte en el sistema ideal para emisoras de carácter local por su gran fidelidad en la transmisión de la música y el lenguaje hablado.[1]
- La propagación de la señal de frecuencia modulada debe ser en línea de vista.
- Electrónica más compleja que otras modulaciones analógicas.
- Gran ancho de banda requerido, a que este método de modulación produce un gran número de bandas laterales a ambos lados de la frecuencia fundamental de la portadora teniéndose entre éstas una separación igual a la frecuencia de la señal modulante.[5]

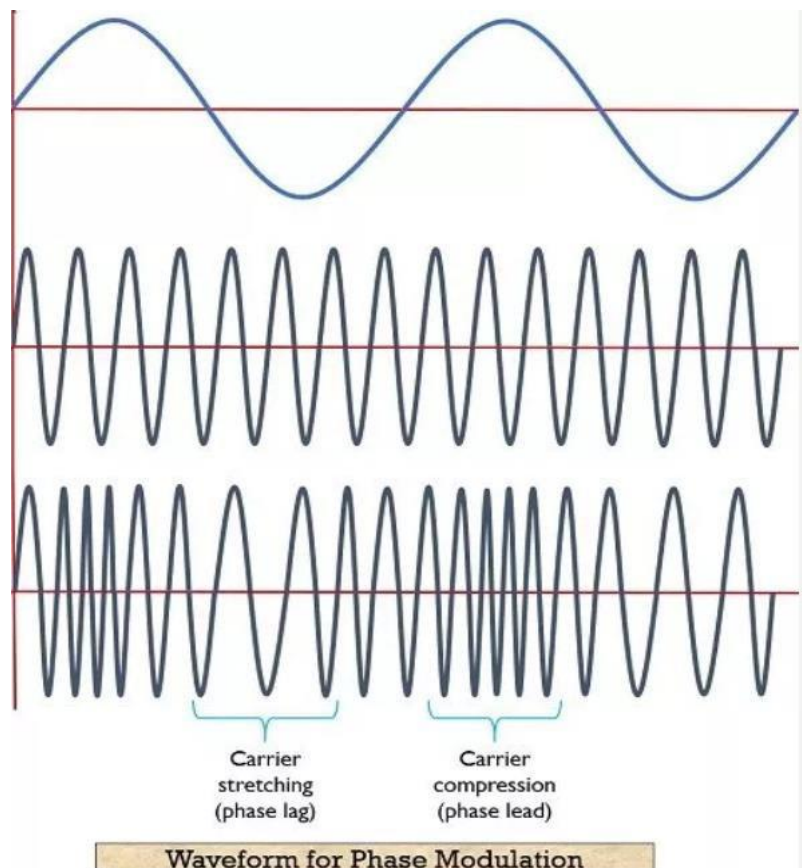
### **VENTAJAS**

- Mayor inmunidad al ruido
- Inmune a descargas eléctricas
- Señales de bajas frecuencias
- Mayor calidad de reproducción.
- Fidelidad mejorada.
- En la transmisión de señales FM se puede intercambiar de forma efectiva potencia por ancho de banda de transmisión o lo que es lo mismo se puede mejorar la relación S/N en el receptor sin necesidad de aumentar la potencia de transmisión.[3]
- Mejor uso de la potencia. La modulación FM es inmune a las no linealidades. Las no linealidades en este caso generan ondas moduladas con portadoras múltiplos de la original.[4]
- Permite diseñar multiplicadores de frecuencia (generadores de ondas FM con portadora múltiplo de la original) a partir de sencillos elementos no lineales.

## APLICACIONES

- Principales aplicaciones radio difusión y TV
- Utilizadas como sub-portadoras de sonido, en micrófonos inalámbricos y como en ayuda en navegación
- En el sistema de televisión en color SECAM (Color secuencial con memoria) donde modula la información de color en FM.
- En los sistemas de vídeo analógicos, incluyendo VHS, para registrar la luminancia (blanco y negro) de la señal de video.
- En las frecuencias de audio se las utiliza para sintetizar sonido.
- Sistemas de control: una importante alternativa a los rayos infrarrojos en multitud de situaciones cotidianas, desde puertas de garaje hasta teclados y ratones inalámbricos. La modulación angular se usa en forma extensa para radioemisión comercial, televisión y transmisión de sonido, radioteléfonos, radio celulares y sistema de comunicaciones por microondas y satélites.[6]

## MODULACIÓN ANGULAR



La modulación angular se produce siempre que se varia en Angulo de fase,  $\theta$ , de una onda senoidal, con respecto al tiempo. Una onda con modulación angular se describe matemáticamente como sigue:

$$m(t) = V_c \cos(wct + \theta(t))$$

$m(t)$  = onda con modulación angular

$V_c$  = amplitud máxima de portadora (volts)

$wc$  =frecuencia de la portadora en radianes, es decir, velocidad angular en radianes por segundo

$\theta(t)$  = desviación instantánea de fase (radianes)

Si la frecuencia de la portadora se hace variar directamente de acuerdo con la señal moduladora se obtiene la FM. Si se varia la fase de la portadora en forma directa por la señal moduladora, resulta la PM. Por consiguiente, la FM directa es PM indirecta, y la PM directa es FM indirecta.

## **PARÁMETROS DE MODULACIÓN**

### **DESVIACIÓN INSTANTÁNEA DE FASE**

Cambio instantáneo en la fase de la portadora, en un instante de tiempo, e indica cuanto está cambiando la fase de la portadora con respecto a su fase de referencia.

Desviación instantánea de fase =  $\theta(t)$  rad

### **FASE INSTANTÁNEA**

Es la fase precisa de la portadora, en un instante de tiempo. Fase instantánea =  $wct + \theta(t)$  rad

Donde:

$wct$  = fase de referencia de la portadora (radianes) =  $2\pi(\text{rad/ciclo}) f_o$  =frecuencia de portadora (hertz)

$\theta(t)$  =desviación instantánea de fase (radianes).

### **DESVIACIÓN DE FRECUENCIA INSTANTÁNEA**

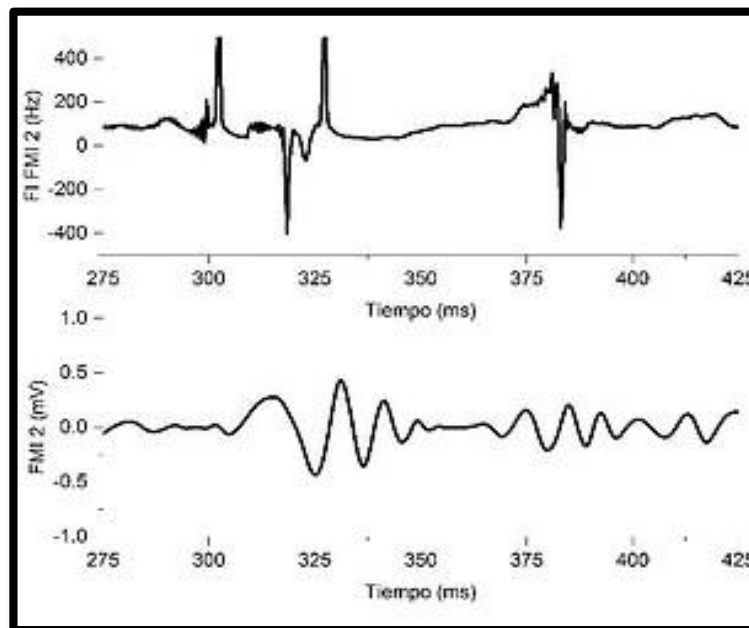
Es el cambio instantáneo en la frecuencia de la portadora, se define como la primera derivada con respecto al tiempo de la desviación de fase instantánea, en un instante de tiempo, e indica cuanto está cambiando la fase de la portadora con respecto a su fase de referencia.[3]

Desviación instantánea de frecuencia  $=\theta'(t)$  rad/sec

## FRECUENCIA INSTANTÁNEA

Es la frecuencia precisa de la portadora, en un instante de tiempo. Es la primera derivada con respecto al tiempo de la fase instantánea.[4]

$$F_c = \theta'(t)/2\pi \text{ Hz}$$



## SENSIBILIDAD A LA DESVIACIÓN

Para una señal moduladora  $V_m(t)$  la modulación de fase y la de frecuencia son:

Modulación de Fase:  $\theta(t) = K V_m(t)$  Modulación de Frecuencia:  $\theta'(t) = K_1 V_m(t)$

$K$  y  $K_1$ ; constantes y son las sensibilidades a la desviación son las funciones de transferencia de salida en función de la entrada de los moduladores de fase y frecuencia.

## CONSTANTE SENSIBILIDADES

La modulación de fase es la primera integral de la modulación de frecuencia. Por consiguiente:

Modulación de fase:

$$m(t) = V_c \cos(\omega_c t + \theta(t))$$

Para modulación de frecuencia:

$$m(t) = V_c \cos(\omega_c t + K V_m \cos(\omega_m t))$$

## ÍNDICE DE MODULACIÓN

Llamada también máxima desviación de fase y es directamente proporcional a la amplitud de la señal modulante e inversamente proporcional a su frecuencia.

El índice de modulación para FM es:

$$m = K_1 V_m / W_m = \Delta f / f_m \text{ Donde:}$$

$m$  = índice de modulación (adimensional)

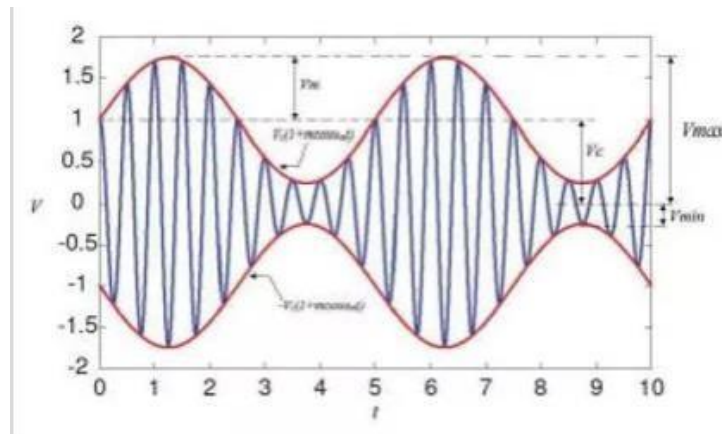
$K_1$  = sensibilidad a la desviación (radianes por segundo por volt, o radianes por volt)  $V_m$  = amplitud máxima de la señal moduladora (volts)

$W_m$  = frecuencia en radianes (radianes por segundo)

## DESVIACIÓN DE FRECUENCIA

Es el cambio de frecuencia que ocurre en la portadora, cuando actúa sobre él una señal modulante.

$$\Delta f = K_1 V_m$$



## PORCENTAJE DE MODULACIÓN

El porcentaje de modulación es tan sólo la relación de desviación de frecuencia producida realmente, entre la desviación máxima de frecuencia permitida, expresada en forma porcentual. La ecuación correspondiente es

$$\% \text{ Modulación} = \Delta f(\text{max}) / \Delta f(\text{real})$$

## MODULADORES Y DEMODULADORES DE FASE Y DE FRECUENCIA

Un modulador de fase es un circuito en el que se hace variar la portadora de tal modo que su fase instantánea es proporcional a la señal moduladora.[7]

Un modulador de FM que está precedido por un diferenciador produce una onda de salida en la que la desviación de fase es proporcional a la señal moduladora y equivale, en consecuencia, a un modulador de fase. Son posibles algunas otras equivalencias interesantes.

Modulador de PM = diferenciador seguido por un modulador de FM.

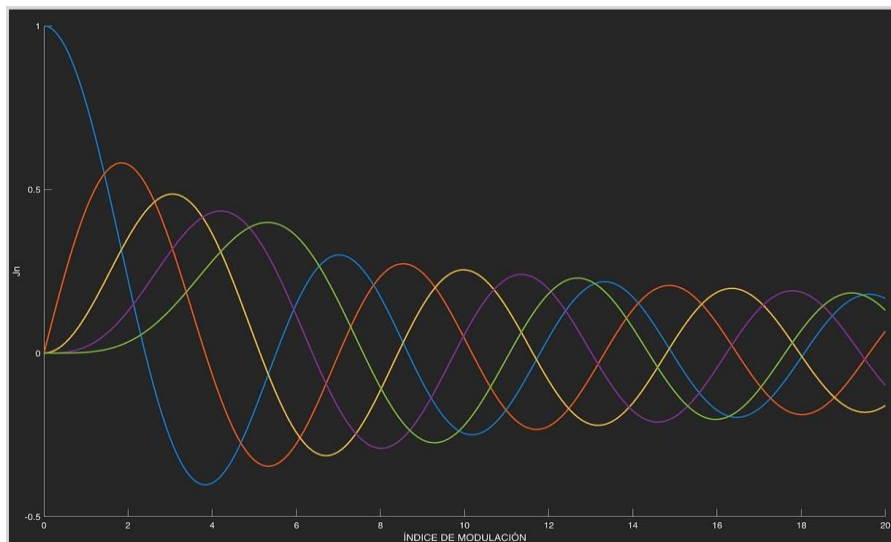
Demodulador de PM = demodulador de FM seguido por un integrador.

Modulador de FM = integrador seguido por un modulador de PM.

Demodulador de FM = demodulador de PM seguido de un diferenciador.

## ANÁLISIS EN FRECUENCIA DE LAS ONDAS CON MODULACIÓN ANGULAR

Amplitud de las frecuencias laterales



Modulation index	Sideband																
	Carrier	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0.00	1.00																
0.25	0.98	0.12															
0.5	0.94	0.24	0.03														
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02													
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01												
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03												
2.41	0	0.52	0.43	0.20	0.06	0.02											
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	0.01										
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01										
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02									
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02								
5.53	0	-0.34	-0.13	0.25	0.40	0.32	0.19	0.09	0.03	0.01							
6.0	0.15	-0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02							
7.0	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02						
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03					
8.65	0	0.27	0.06	-0.24	-0.23	0.03	0.26	0.34	0.28	0.18	0.10	0.05	0.02				
9.0	-0.09	0.25	0.14	-0.18	-0.27	-0.06	0.20	0.33	0.31	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01			
10.0	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.32	0.29	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01		
12.0	0.05	-0.22	-0.08	0.20	0.18	-0.07	-0.24	-0.17	0.05	0.23	0.30	0.27	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01

Las formas de onda con modulación angular se clasifican como de índice bajo, medio o alto. Para el caso de bajo índice, el índice de modulación es menor que 1, y el caso de índice alto se da cuando el índice de modulación es mayor que 10.

Los índices de modulación mayores que 1 y menores que 10 se clasifican como índice medio. [5]

Con modulación angular de bajo índice, la mayor parte de la información de la señal está contenida en el primer conjunto de bandas laterales, y que el ancho mínimo de banda requerido es aproximadamente igual a dos veces la frecuencia máxima de la señal moduladora. por esta razón, a los sistemas de FM de bajo índice se les llama de FMI de banda angosta.

## **ETAPAS DE UN MODULADOR POR FRECUENCIA ANALÓGICO**

### **Amplificador**

Amplificación es la encargada de amplificar la señal para poder atacar las etapas siguientes.

### **Modulación FM**

Es decir, modulada en frecuencia, intervienen tres señales: señal portadora, señal de modulación y señal modulada.

### **Amplificador de señal**

La señal modulada en frecuencia del oscilador pasa a un amplificador de potencia de radiofrecuencia.

### **Acoplador de antena**

Circuito que provee un medio de transferir la máxima energía desde el amplificador final hasta la antena.

### **Antena**

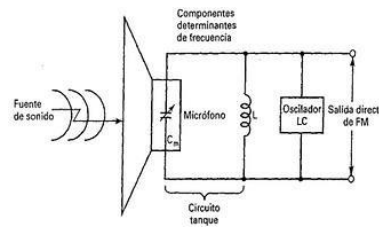
Es el elemento que transforma las señales eléctricas que se encuentran contenidas en el interior del circuito en ondas electromagnéticas que viajan por el aire.

## **TIPOS DE MODULADORES DE FRECUENCIA ANALÓGICO**

### **Moduladores directos de FM**

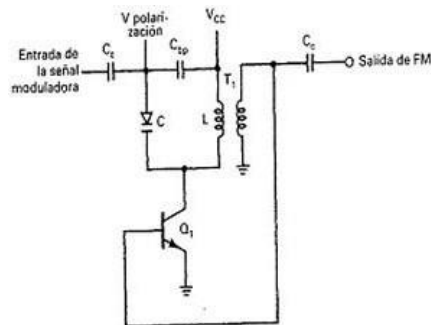
La modulación angular de FM directa es aquella en la que se varia (se desvía) la frecuencia de la moduladora., en forma directa, mediante la señal moduladora. La desviación instantánea de frecuencia es directamente proporcional a la amplitud de la señal moduladora.[7]





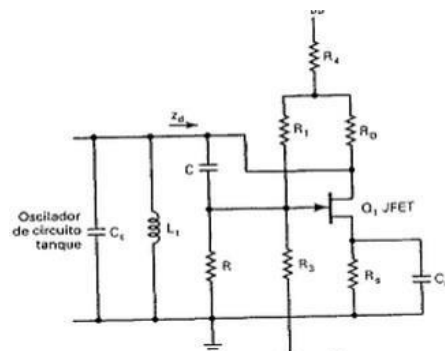
## Moduladores con diodo Varactor

Un modulador por diodo varactor es uno de los sistemas más sencillos de generar una señal de FM. Un diodo varactor proporciona la capacidad total al circuito tanque de un oscilador. Se usa un diodo varactor para transformar los cambios de amplitud de la señal moduladora en cambios de frecuencia.



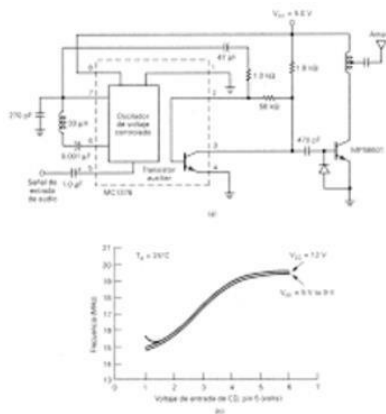
## Moduladore FM de Reactancia

En el modulador de reactancia que usa un JFET, es de reactancia porque el JFET se ve como una carga de reactancia variable desde el circuito tanque LC. La señal moduladora hace variar la reactancia de Q1, lo que causa un cambio correspondiente en la frecuencia de resonancia del circuito tanque oscilador.[8]



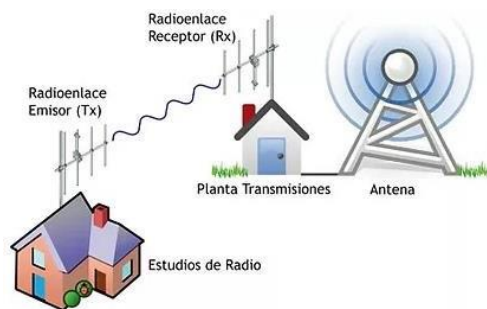
## Transmisor directo FM de Crosby

La configuración que se muestra a continuación se llama transmisor directo de Fm de Crosby e incluye un circuito AFC (automatic frequency control) El modulador de frecuencia puede ser un modulador de reactancia o un oscilador de voltaje controlado.



## Transmisión Indirecta

Con la FM indirecta, la señal moduladora desvía en forma directa la fase de la portadora, y esta, a su vez, cambia la frecuencia en forma indirecta.[9]



## Transmisor indirecto de Armstrong

Con la Fm indirecto, la señal modulada desvía directamente la fase de la portadora, la cual cambia indirectamente la frecuencia. La figura que se muestra a continuación muestra el diagrama de bloques para un transmisor FM indirecto de Armstrong de banda ancha. La fuente de la portadora es un cristal, por lo tanto los requerimientos de estabilidad para la frecuencia de la portadora establecida por la FCC, se pueden lograr sin usar un circuito de AFC.



## DEMODULADOR FM

El parámetro de la señal de entrada que es útil para la demodulación es el valor de la frecuencia, para a partir de él proporcionar en su salida un cierto valor de amplitud, usualmente voltaje, por lo que un demodulador de FM es un convertidor de frecuencia a voltaje. La salida

del demodulador va a ser proporcional a la frecuencia instantánea de la señal a la entrada.[10]

## CARACTERÍSTICAS

Es muy similar a un receptor de AM convencional. Las etapas de RF mezclador y de IF son casi idénticas a las que se usan en los receptores de AM, aunque los receptores de FM generalmente tienen más amplificación de IF.

Para los receptores de banda de radiodifusión de FM, el primer IF es de una frecuencia relativamente alta (generalmente, 10.7 MHz) para un buen rechazo a la frecuencia imagen, y el segundo IF es una frecuencia relativamente baja (normalmente 455 kHz).

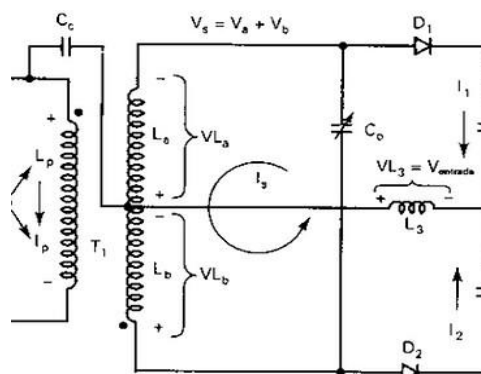
Recibe una señal de entrada que varía en la frecuencia (Frecuencia modulada). El demodulador responde a las variaciones de frecuencia.

Actúa como un convertidor de frecuencia a voltaje.

Puede obtenerse de manera indirecta produciendo en la señal FM una modulación en amplitud en función de la frecuencia y demodular esta señal como señal de AM.

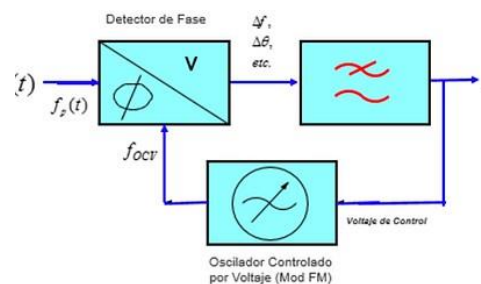
### Demodulación por desviación de Fase

La variación de amplitud se obtiene variando la fase de la señal modulada y sumándola con la modulación original. El circuito a continuación corresponde a un detector de Fase (Foster-Seeley).



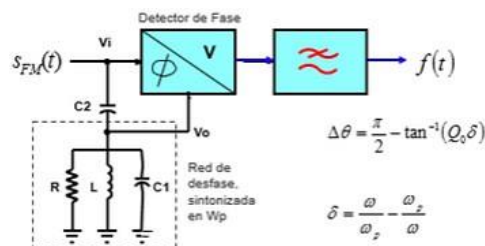
## Demodulación con lazo de sincronización de Fase (PLL)

El detector de fase proporciona una señal proporcional a la diferencia de frecuencias y de fases de las dos señales presentes en sus entradas. El filtro pasa-bajas obtiene de la salida del detector de fase un voltaje proporcional a las diferencias de frecuencia y de fase. El oscilador controlado por voltaje, oscilando originalmente a una frecuencia cercana a la frecuencia de la señal portadora, varía su frecuencia en función del voltaje de control.[11]



### Demodulador de Cuadratura.

La red de desfase produce en  $V_o$  un desfase en función del valor de frecuencia de la señal  $S_{FM}(t)$ , mientras que el detector de fase en conjunción con el filtro pasa-bajas proporciona un voltaje proporcional a la diferencia de fases entre  $V_i$  y  $V_o$ , es decir, proporcional a la frecuencia de  $S_{FM}(t)$  y por lo tanto proporcional a la señal de información.[11]



## ETAPAS DE UN DEMODULADOR DE FRECUENCIA ANALÓGICO

Un receptor de FM funciona esencialmente igual los receptores de AM; sin embargo, la etapa de detector de audio que se usa en los receptores de FM es muy distinta. El detector de envolvente (de picos), común a los receptores de AM, se sustituye por una red limitadora, discriminadora de frecuencia y de énfasis en los receptores de FM. El discriminador de frecuencia extrae la información de la onda modulada, mientras que el circuito limitador y el de énfasis contribuyen a mejorar la relación de señal a ruido que se alcanza en la etapa de demodulador de audio en los receptores de FM.[10]

### El amplificador de frecuencia intermedia IF

amplificador selectivo de radiofrecuencia, cuya finalidad

es la de proporcionar una ganancia lo mayor posible para señales de una frecuencia determinada e invariable cualquiera que sea la señal sintonizada, y modulada en la misma forma en que lo está la señal recibida por antena.

### **El Mezclador**

Encargado de unir la frecuencia sintonizada con la frecuencia del oscilador local para obtener la frecuencia intermedia.

### **Limitador de FM**

El bloque limitador cumple la función de recortar o suprimir la señal interferente. Es posible recortar o limitar la mayor parte de las interferencias producidas ya que éstas se presentan generalmente como pulsos de ruido en amplitud

### **Discriminador reactivo**

Se basa en llevar la señal de FM a una reactancia, normalmente bobinas acopladas, de forma que su impedancia varíe con la frecuencia.

### **Detector con PLL**

La señal del PLL proporciona la señal de modulada. Existen muchas variaciones según la aplicación, pero estos detectores suelen estar en circuitos integrados que, además, contienen los amplificadores de RF y frecuencia intermedia.

## **PARAMETROS TÉCNICOS DE LA COMUNICACIÓN POR MODULACIÓN FM**

- Ancho de banda de 220 KHz para estéreo y 180 KHz para monofónica, con una tolerancia de hasta un 5%.
- Frecuencias de banda base para audio desde 50 Hz hasta 15 KHz.
- Separación entre portadoras será determinada por los grupos de frecuencias correspondientes a cada zona geográfica.
- Porcentaje de modulación sin exceder los siguientes valores en las crestas de recurrencia frecuente.
- Potencia de operación o potencia efectiva radiada los valores a considerarse corresponden a la potencia efectiva radiada.
- Potencias máximas las potencias efectivas radiadas, no excederán de aquellas que se requieran para cubrir los valores máximos autorizados de intensidad de campo en el área de cobertura autorizada.

- Intensidad de campo en el borde del área de cobertura principal  $> \text{ó} = 54 \text{ dBuV/m}$ .
- Relaciones de protección señal deseada/señal no Deseada separación entre Sistema portadoras deseada estereofónico monofónico.
- Distorsión armónica la distorsión armónica total de audiofrecuencia desde las terminales de entrada de audio del transmisor, hasta la salida del mismo, no debe exceder del 0.5% con una modulación del 100% para frecuencias entre 50 y 15000 Hz.
- Niveles de emisión no esenciales deben atenuarse con un mínimo de 80 dB por debajo de la potencia media del ancho de banda autorizado y con una modulación del 100%.

## BIBLIOGRAFÍA:

- [1] M. V. Sabando, Transformada de Fourier y telecomunicaciones, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-SabandoMariaVirginia.pdf>
- [2] Tecnológico Nacional de México, Fundamentos de Telecomunicaciones - Unidad III: Modulación, Zacatecas, México. [En línea]. Disponible en: [https://enlinea.zacatecas.tecnm.mx/pluginfile.php/24436/mod\\_resource/content/1/Unidad%20III.pdf](https://enlinea.zacatecas.tecnm.mx/pluginfile.php/24436/mod_resource/content/1/Unidad%20III.pdf)
- [3] Radios Libres, Métodos de Modulación Digital, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://radioslibres.net/wp-content/uploads/media/uploads/analfatecnicos/15.MetodosModulacionDigital.pdf>
- [4] M. V. Sabando, Transformada de Fourier y telecomunicaciones, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-SabandoMariaVirginia.pdf>