

LABORATORIO DE TEORÍA DE COMUNICACIONES 1 – PARTE TEÓRICA

TEMA: MODULACIÓN EN FRECUENCIA

2024

LABORATORIO DE TEORÍA DE COMUNICACIONES 1 – TEL133

LABORATORIO NÚMERO:	6	SEMESTRE:	2024 – 1
---------------------	---	-----------	----------

TEMA: MODULACIÓN EN FRECUENCIA (FM)



Objetivos de aprendizaje:

- Analizar la técnica de modulación en frecuencia (FM).
- Generar y medir los parámetros de señales de frecuencia modulada.
- Describir la modulación FM para señales en los dominios del tiempo y la frecuencia.
- Modular y demodular una señal de audio.

Actividades	Descripción	Duración	Puntaje
1	Prueba de entrada	10 min.	6
2	Desarrollo de la guía	95 min.	8
3	Evaluación oral	15 min.	6



El contenido de esta guía es de carácter estrictamente personal y aplicable solo para el curso de Teoría de Comunicaciones 1 (TEL133). Cualquier tipo de plagio será sancionado de acuerdo con el reglamento disciplinario de la PUCP.

MODULACIÓN EN FRECUENCIA (FM)

1. INTRODUCCIÓN

Las modulaciones analógicas se producen al variar alguno de los parámetros (amplitud, frecuencia o fase) de una señal senoidal continua (portadora) en función de una señal de información (modulante). Como se ha estudiado anteriormente, al variar la amplitud de la señal portadora, se produce una señal modulada en AM. Análogamente, al variar la frecuencia de la señal portadora se genera una modulación FM.

2. MODULACIÓN FM

La modulación de frecuencia (FM) surgió en la década de los años 30 como una alternativa a la modulación en amplitud; tiene como ventaja una menor susceptibilidad al ruido en comparación a AM. Actualmente, FM se usa extensamente para la radiodifusión de radio comercial, transmisión de sonido de televisión, radio troncalizado, etc.

La modulación FM, es el proceso por el cual se varía la frecuencia angular de una señal portadora senoidal de alta frecuencia, de acuerdo con la forma de onda de la señal modulante. De forma particular, cuando la señal modulante o mensaje es una señal senoidal se tienen las siguientes formas de onda:

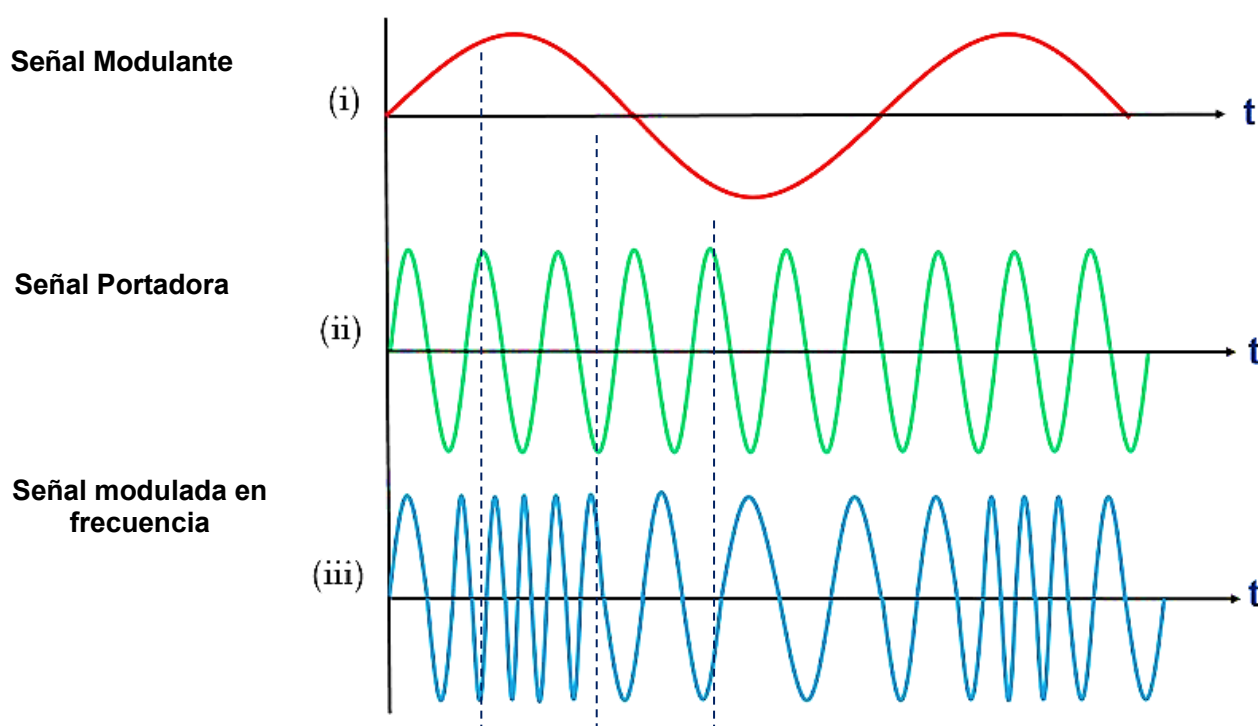


Figura 1. Señales presentes en la modulación FM.

De la gráfica anterior, se observa que la máxima amplitud de la señal modulante produce la frecuencia máxima en la señal modulada; asimismo, para la mínima amplitud, se genera la mínima frecuencia en la señal FM. Además, para la amplitud cero, la frecuencia de la señal modulada es igual a la frecuencia de la portadora.

Se define una señal FM de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\phi_{FM}(t) = A_c \times \cos[\theta(t)] = A_c \times \cos \left[\omega_c t + k_f \int_0^t f(\tau) d\tau \right]$$

Donde:

A_c : amplitud de la señal modulada

$\theta(t)$: ángulo de fase de la señal modulada

ω_c : frecuencia angular de la portadora

k_f : constante de desviación de frecuencia

$f(\tau)$: señal modulante

Considerando la señal modulante:

$$f(t) = a \times \cos[2\pi f_m(t)] = a \times \cos[\omega_m t]$$

Además, la constante k_f tiene las unidades de *radianes por segundo por voltio*, a partir de la cual se puede definir una nueva constante denominada desviación de frecuencia máxima ($\Delta\omega$):

$$\Delta\omega = a \times k_f = 2\pi\Delta f \quad \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

De la fórmula anterior, se puede definir $\Delta f = a \times k_f$; donde k_f tendrá unidades de *Hz/Volt*. Asimismo, k_f también se conoce como la sensibilidad de desviación de frecuencia.

Finalmente, a la relación adimensional entre la desviación de frecuencia máxima y la frecuencia angular de la señal modulante se le denomina el índice de modulación (β):

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} = \frac{2\pi\Delta f}{2\pi f_m} = \frac{\Delta f}{f_m}$$

3. ESPECTRO FM

El espectro de la señal FM consta de un número infinito de funciones delta de Dirac, el cual es el espectro de una senoidal multiplicada por una constante (de las funciones de Bessel). Sin embargo, el número de componentes espectrales significativas; es decir, que contienen energía es limitado, lo cual delimita el ancho de banda de la señal FM.

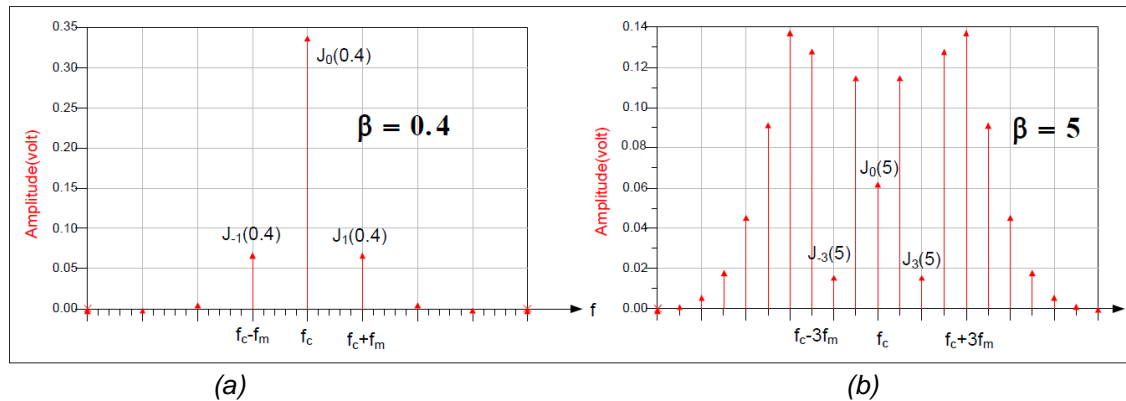


Figura 2. Espectro FM (a) de banda angosta (narrow band) y (b) de banda ancha (wide band)

Propiedades del espectro de una señal FM:

El espectro de una señal FM consiste en una componente espectral de la señal portadora más un infinito número de bandas laterales a frecuencias

$f \pm n f_m$ ($n: 1, 2, 3, \dots$). Sin embargo, el número significativo de bandas laterales depende primordialmente del valor de β . A diferencia del espectro de AM donde la modulación de una señal senoidal (tono) solo produce tres componentes espectrales.

La amplitud relativa de los componentes espectrales de la señal FM depende de los valores de $J_n(\beta)$. Mientras que, la amplitud relativa de la señal portadora depende de $J_0(\beta)$ y de la señal modulante.

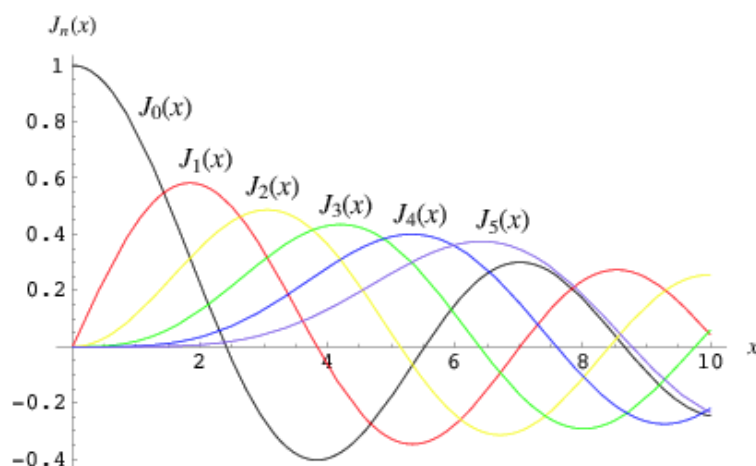


Figura 3. Funciones $J_n(x)$ de Bessel.

Del análisis de las *Funciones de Bessel* se puede obtener el ancho de banda de la FM a partir de la *Regla de Carson*, que considera las componentes de frecuencia significativas. Si $\beta \ll 1$, el ancho de banda corresponde a una señal de banda angosta ($B_{TX} \approx 2f_m$).

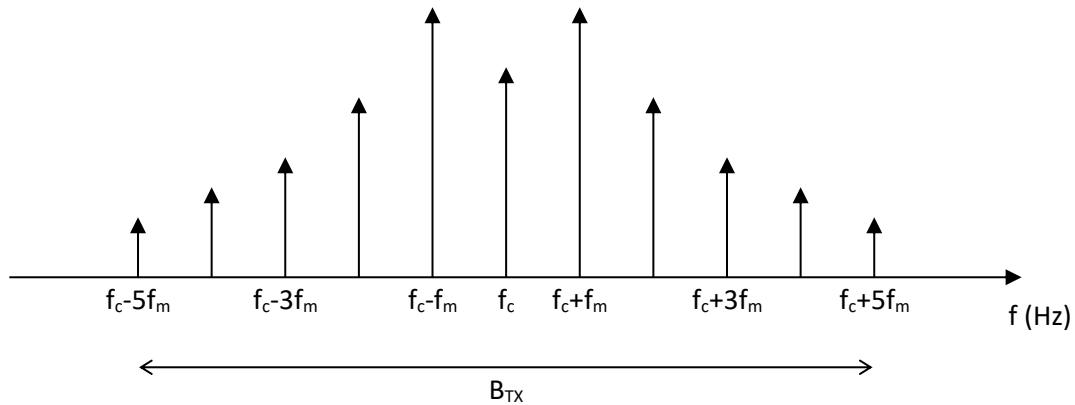


Figura 4. Espectro de la señal FM.

Regla de Carson:

En la práctica, la Regla de Carson es muy usada debido a que proporciona una aproximación muy conveniente y razonablemente exacta. Esto debido a que la potencia promedio desperdiciada en las bandas laterales es pequeña e inferior al 1% de la potencia promedio total de la señal FM. A continuación, se expresan los anchos de banda usando la regla de Carson y la regla de la FCC respectivamente.

$$B_{TX} = 2f_m(\beta + 1) \text{ Hz}$$

y

$$B_{TX} = 2f_m(\beta + 2) \text{ Hz}$$

4. MODULADORES FM

Las modulaciones FM pueden ser de banda angosta o banda ancha, y se pueden lograr mediante los métodos directo o indirecto.

- **FM directa:** En este método, la frecuencia de la portadora varía de forma directamente proporcional a la señal modulante.
- **FM indirecta:** Fue propuesto por primera vez por Armstrong. En este método, primero se usa la señal modulante para producir una señal FM de banda angosta, y luego se usa la multiplicación de frecuencia para aumentar la desviación de frecuencia al nivel deseado.

Una forma de obtener un modulador de “**banda angosta**” es mediante el método directo. Este tipo de moduladores usa un oscilador de cristal, que se caracteriza por tener una buena estabilidad de frecuencia y pureza de fase. Por ello, mediante el oscilador de cristal (con frecuencia estable frente a variaciones de voltaje) la desviación pico de frecuencia se limita a valores relativamente muy pequeños. Una aplicación de banda angosta es una radio móvil semi-dúplex.

Asimismo, como se mencionó anteriormente, los moduladores de “**banda ancha**” se pueden lograr a partir de una modulación de banda angosta y aplicando un multiplicador de frecuencias (método de generación FM indirecto de Armstrong).

Además, se puede generar una modulación de **banda ancha** de forma directa a través de un Oscilador Controlado por Voltaje (VCO); sin embargo, como la frecuencia está controlada directamente por la tensión de la señal moduladora, a la larga la estabilidad de la frecuencia no será tan buena como en el oscilador estabilizado por cristal usado en el método indirecto. Por tal motivo, los métodos directos deben usar alguna forma de estabilización de frecuencia adicional. En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques de transmisión y recepción básicos para un modulador FM:

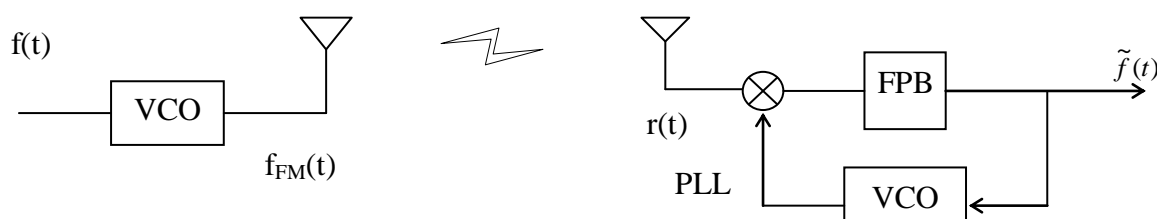
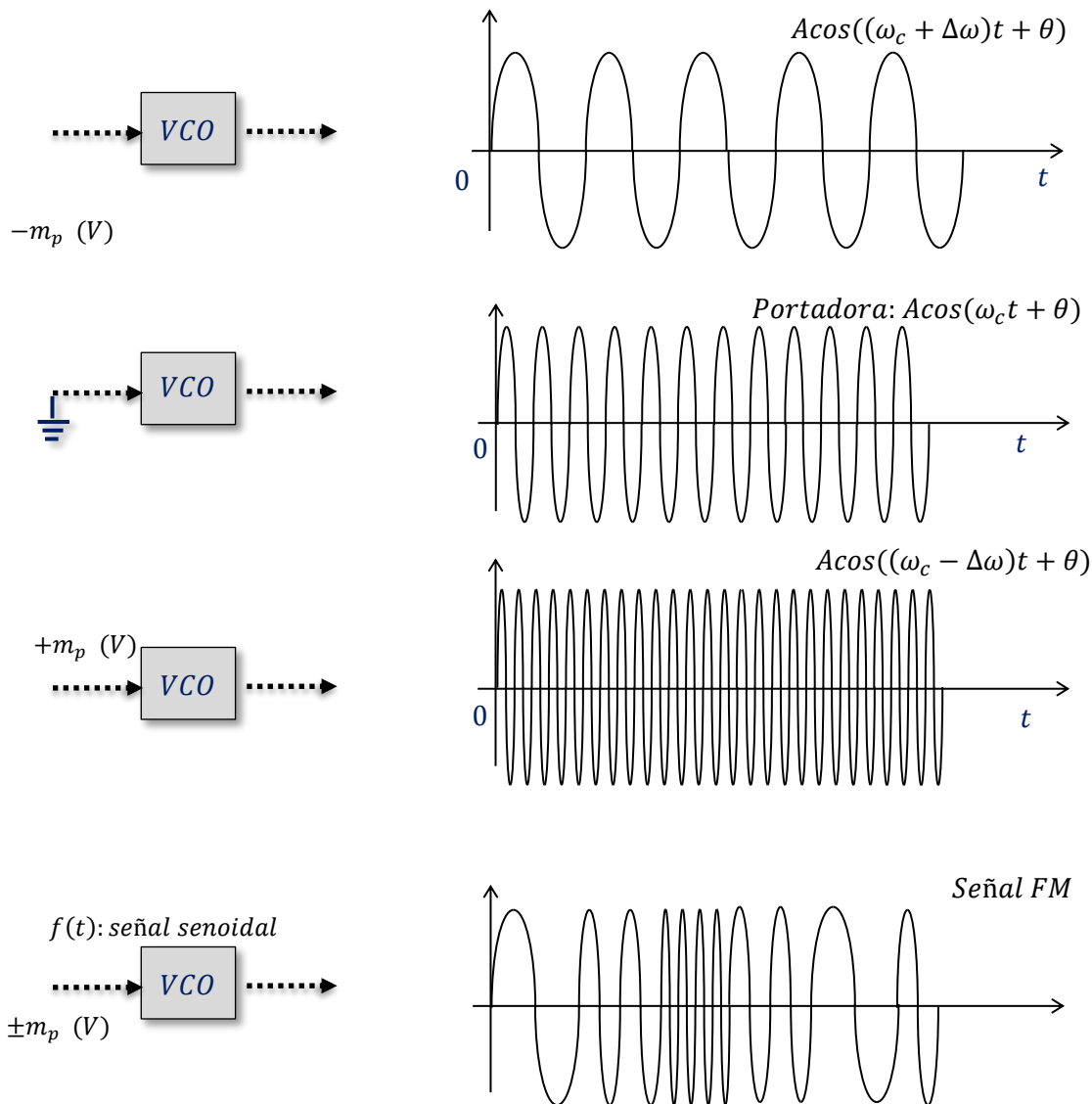


Figura 5. Modulador/demodulador básicos.

Operación del VCO:



El VCO recibe una señal modulante entre $-m_p$ a $+m_p$ Voltios Voltios que hace variar la frecuencia de salida alrededor de una frecuencia central. La señal de entrada puede ser DC, en cuyo caso se puede observar con facilidad la relación frecuencia de salida - voltaje de entrada.

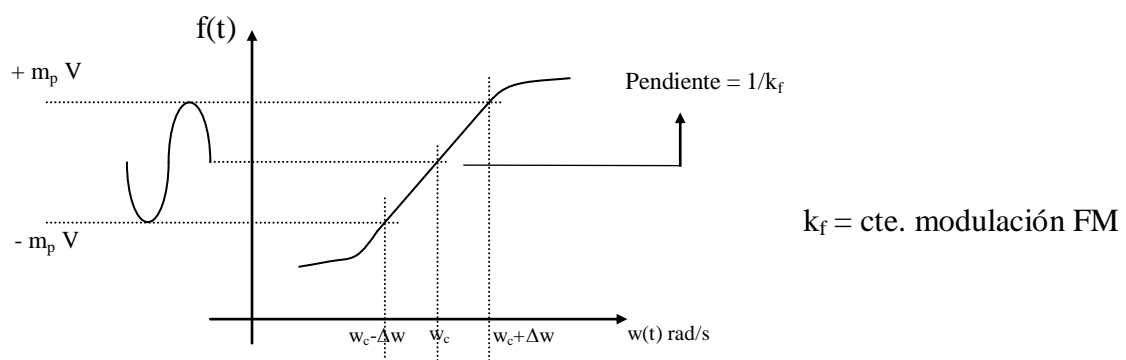


Figura 6. Frecuencias generadas por el VCO.

5. DEMODULADORES FM

La demodulación FM es un proceso en la recepción, donde las variaciones de frecuencia se convierten en variaciones de amplitud (voltajes). La señal FM es recibida para recuperar la señal original en la portadora, cuando la frecuencia de la portadora se desvía hacia el extremo inferior del rango de frecuencias, se produce el voltaje más bajo y viceversa.

Los demoduladores FM son implementados generando una señal AM, donde la amplitud es proporcional a la frecuencia instantánea de la señal FM. Los dispositivos discriminadores FM están compuestos por un diferenciador (derivador) seguido de un detector de envolvente. La señal FM ingresa a la entrada del diferenciador y a la salida de este se produce la modulación en amplitud y frecuencia a la vez. Las variaciones de amplitud son detectadas por el detector de envolvente para recuperar la señal modulante (como en AM).

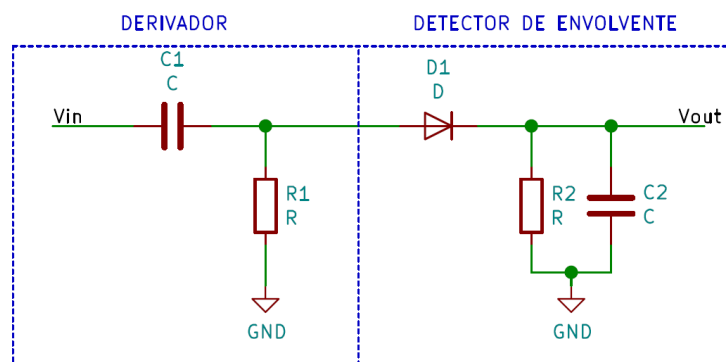


Figura 7. Circuito esquemático de un demodulador FM.

Ventajas y desventajas de algunos tipos de demoduladores FM:

- Detector de Pendiente (Slope Detector): La forma más simple de detección, consiste un circuito sintonizado donde la frecuencia central se sintoniza a una frecuencia ligeramente desplazada de la señal portadora. Sin embargo, no mantiene la linealidad ya que la salida depende de la curva del filtro. Al demodular en amplitud y frecuencia, la señal es susceptible al ruido aditivo y la interferencia.

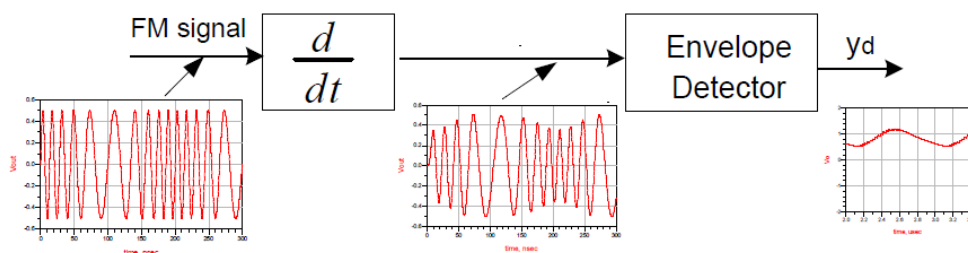


Figura 8. Detector de pendiente.

- Demodulador FM - PLL: Este demodulador retroalimentado con enganche de fase tiene un mejor comportamiento en presencia de ruido y opera al configurar el lazo de enganche de fase (PLL), de tal forma que siga el cambio de la frecuencia instantánea de la señal FM entrante. No presenta sensibilidad al ruido por amplitud, y posee un alto grado de linealidad en todo el ancho de banda de la señal FM, ya que el PLL posee un amplio ancho de banda.

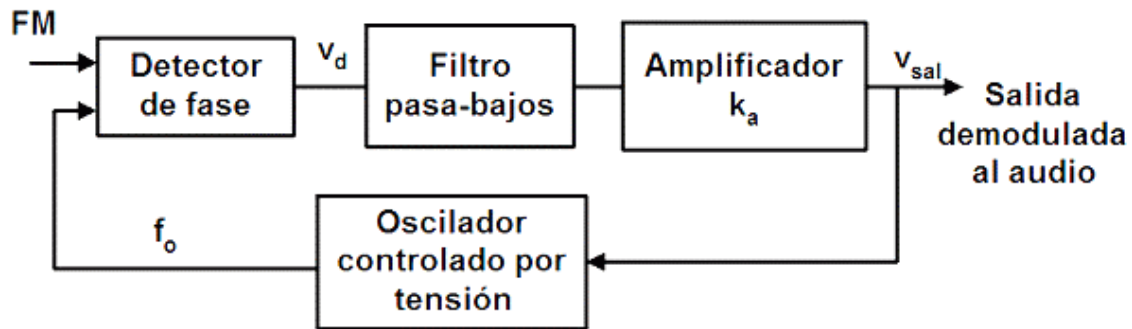


Figura 9. Esquema del circuito demodulador FM con PLL.

El circuito PLL es un lazo de control cuyo fin es igualar un oscilador a una oscilación de referencia tanto en frecuencia como en fase.

La fase de la señal FM que llega al receptor es medida y el detector de fase efectúa la diferencia entre ella y la fase del VCO. La señal de salida del detector de fase es filtrada (filtro de lazo) y alimentada a la entrada del VCO. Esto contribuye con el siguiente establecimiento de frecuencia de la señal del VCO. Como en FM la frecuencia de la señal que ingresa al PLL cambia con el tiempo, el voltaje AC que se obtiene a la salida del filtro de lazo es proporcional a la señal modulante. Esto se debe a que en estado estacionario las dos señales que ingresan al detector de fase se igualan. La primera es la señal FM y la segunda es la salida del VCO. Como el VCO es idéntico al modulador FM del transmisor, si su salida es la señal FM, entonces su entrada deberá ser la señal modulante. Es así como se obtiene la señal modulante o mensaje $f(t)$.

Preénfasis – Deénfasis

Puede usarse preénfasis para las señales de entrada y deénfasis para las señales de salida. En la radiodifusión FM ocurre que las señales de audio tienen la mayor parte de la energía en las frecuencias más bajas. Sin embargo, en la salida del demodulador FM la DEP del ruido crece parabólicamente con la frecuencia, por lo cual es mayor el intervalo de frecuencias en que la DEP de la señal es menor. Esto se contrarresta al acentuar las componentes de alta frecuencia de la señal de entrada del transmisor antes de la transmisión con un filtro de preénfasis. En la salida del demodulador FM del receptor se efectúa la operación inversa usando un filtro de deénfasis con lo que el espectro de la señal recupera su forma original, pero con menor DEP de ruido que se introdujo en la transmisión.

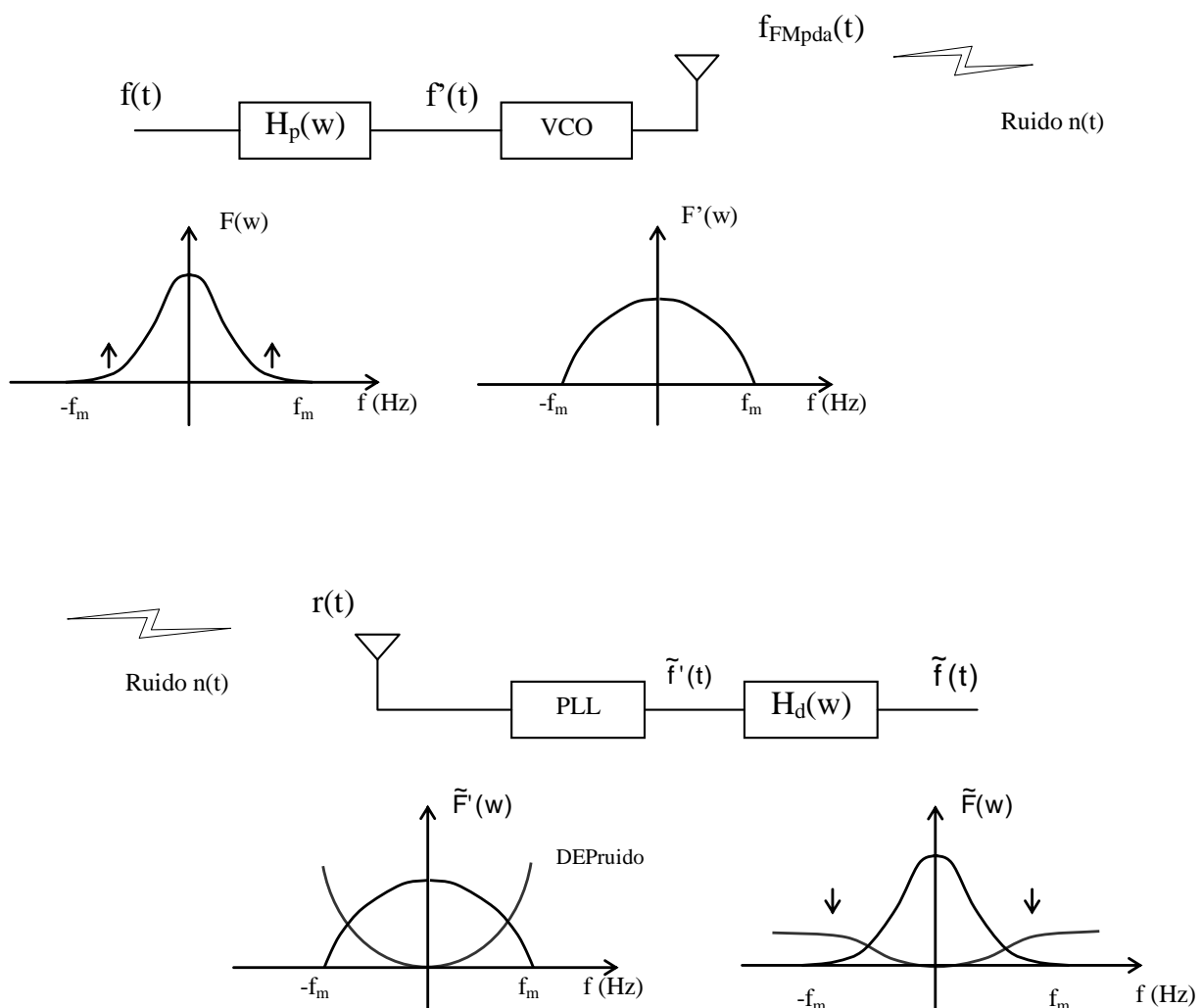


Figura 10. Modulación y demodulación usando Preénfasis y Deénfasis.