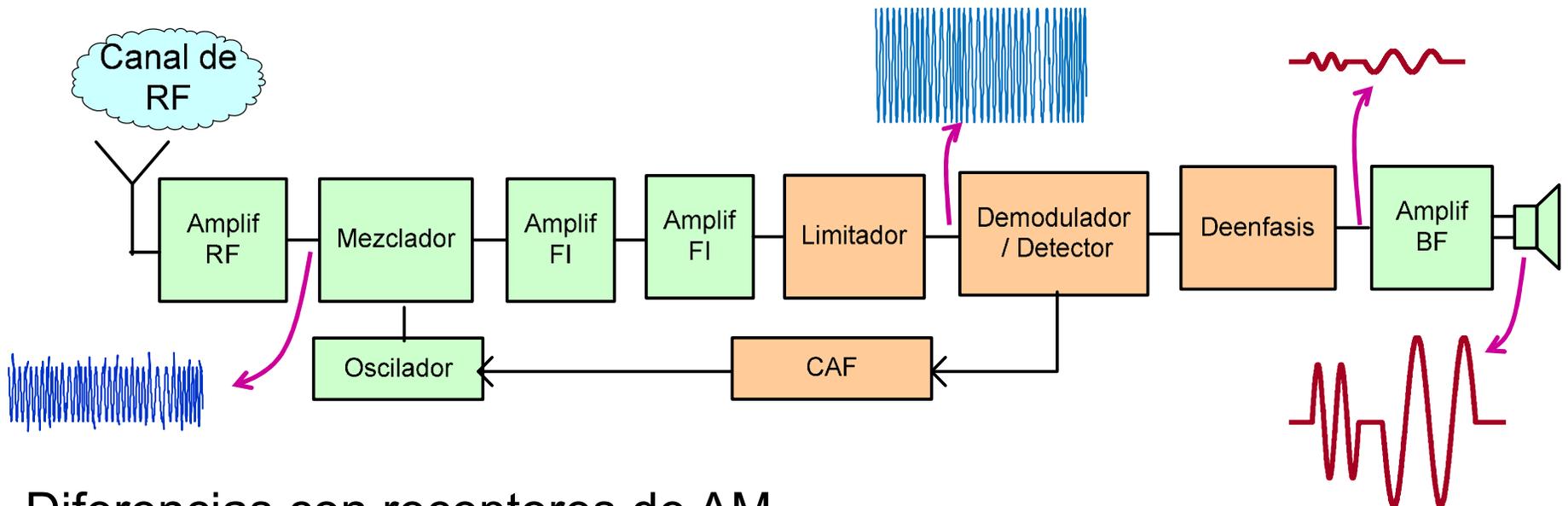


**Demoduladores de
señales moduladas
en ángulo**



Diferencias con receptores de AM.

- FI= 10,7MHz, AB=200KHz
- Limitadores de amplitud
- Los demoduladores convierten variaciones de ángulo en variaciones de amplitud. Hay Detectores de frecuencia o fase.
- Control automático de frecuencia
- Deénfasis

FM comercial:

- Banda: 88MHz a 108 MHz
- $AB_{FM}=180KHz$, $\Delta f_{m\acute{a}x}=75KHz$; $f_{m\ m\acute{i}n}=100Hz$, $f_{m\ m\acute{a}x}=15KHz$

Modulación Angular

- También llamada exponencial o no lineal.
- La amplitud de la onda se mantiene constante, mientras que se varía el ángulo de la portadora de forma proporcional a la información.

$$\cos \varphi(t) = \cos \underbrace{(\omega t + \theta)}_{\text{Angulo}}$$

- **PM:** Se hace variar a la fase de forma proporcional a la información.

$$\varphi(t) = \omega_c t + K_p v_m(t)$$

- **FM:** Se hace variar a la frecuencia instantánea de forma proporcional a la información.

$$\omega = \omega_c + K_f v_m(t) = \omega_c + \Delta\omega$$

Las expresiones de las respectivas ondas moduladas son:

$$v_{PM}(t) = V_C \cos \left[\omega_c t + K_p v_m(t) \right]$$

$$v_{FM}(t) = V_C \cos \left(\omega_c t + K_\omega \int v_m(t) dt \right)$$

Las frecuencias instantáneas son:

$$\omega_{i PM} = \omega_c + K_p \frac{\partial v_m(t)}{\partial t} = \omega_c + \Delta\omega$$

$$\omega_{i FM} = \omega_c + K_\omega v_m(t) = \omega_c + \Delta\omega$$

- En PM la frecuencia es directamente proporcional a la derivada de la información, que es equivalente a la pendiente de la señal. A más pendiente de la señal de información: más frecuencia.

- En FM la frecuencia es directamente proporcional a la información. A mayor amplitud de la información: mayor frecuencia.

- Si

$$v_m(t) = V_m \cos \omega_m t$$

$$\Delta\theta_{m\acute{a}x} = m_p = K_p V_m$$

$$\Delta f_{m\acute{a}x} = K_p V_m f_m$$

$$\Delta\theta_{m\acute{a}x} = m_f = \frac{K_f V_m}{f_m}$$

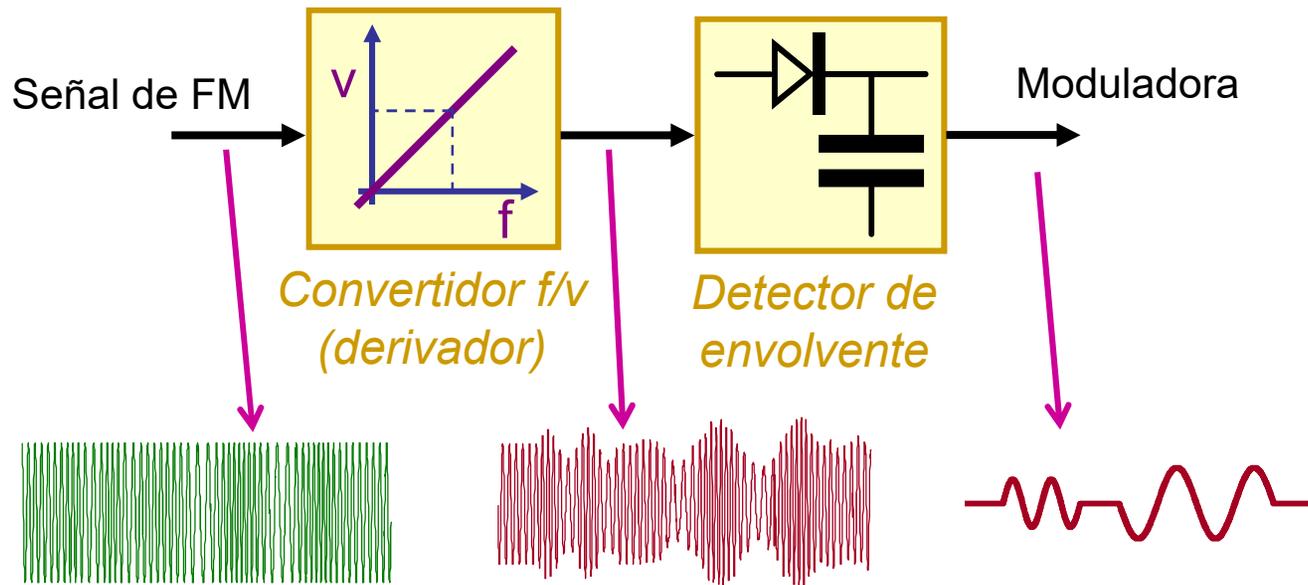
$$\Delta f_{m\acute{a}x} = K_p V_m$$

$$f_{i PM} = f_c + \Delta f$$

$$f_{i FM} = f_c + \Delta f$$

- Detector de pendiente
- Discriminadores
- Detector de cuadratura
- Demoduladores con PLLs

Esquema general de un demodulador



- Se tiene la señal de FM:
- Si se deriva:

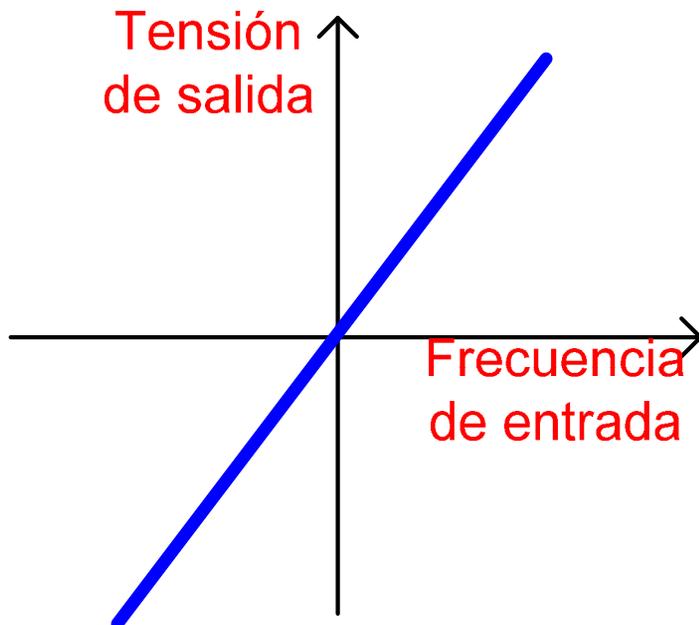
$$v_{FM}(t) = V_C \cos(\omega_c t + K_\omega \int v_m(t) dt)$$

$$\frac{dv_{FM}(t)}{dt} = -V_C \operatorname{sen}\left(\omega_c t + K_\omega \int v_m(t) dt\right) (\omega_c + K_\omega v_m(t))$$

$$\frac{dv_{FM}(t)}{dt} = -V_C \omega_c \left(1 + \frac{K_\omega}{\omega_c} v_m(t)\right) \operatorname{sen}\left(\omega_c t + K_\omega \int v_m(t) dt\right)$$

Estructura similar al de una señal de AM

$$v_{AM}(t) = V_c \left(1 + \frac{1}{V_c} v_m(t)\right) \cos \omega_c t$$



Si se deriva en el tiempo una señal de FM se obtiene una señal de AM.

- $K_d = V/Hz$ (pendiente) es la función de transferencia para el demodulador y se la llama **sensibilidad del demodulador**.
- Δf es la diferencia entre la frecuencia de entrada y la frecuencia central del demodulador.

- El derivador, debe tener una función de transferencia lineal con la frecuencia
- A la salida del derivador, la información está en la envolvente de la señal.
- La señal AM presenta también una modulación FM que no interesa.

Se observa en:

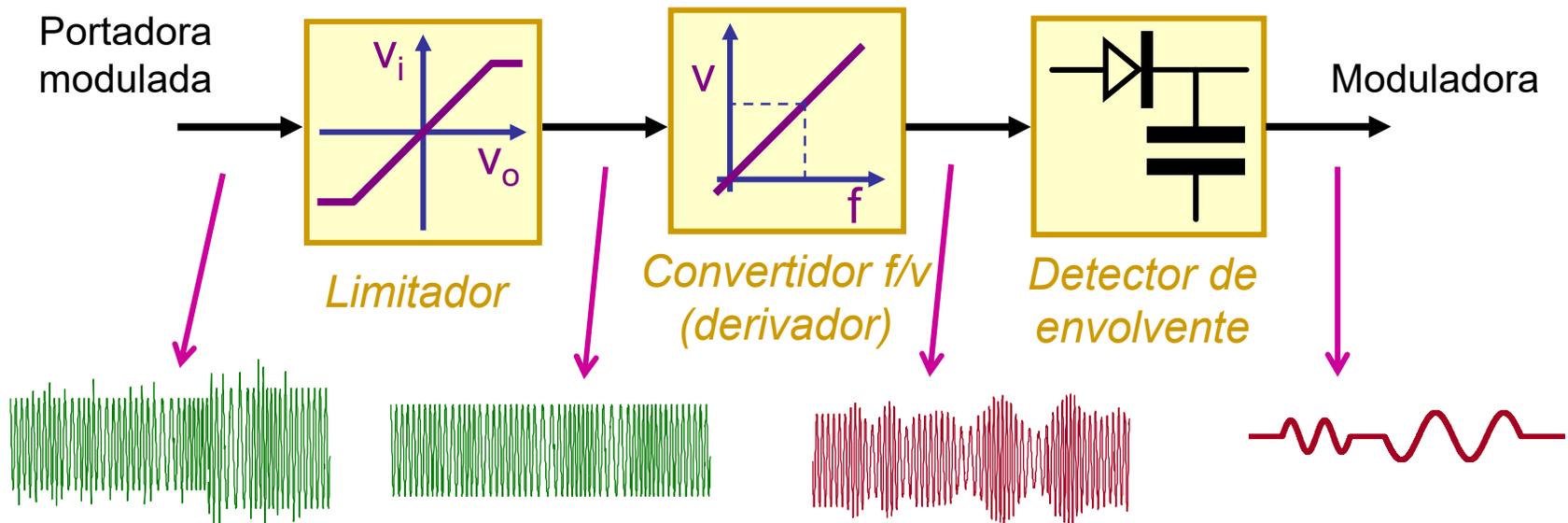
$$\frac{dv_{FM}(t)}{dt} = -V_C \omega_c \left(1 + \frac{K_\omega}{\omega_c} v_m(t) \right) \cdot \text{sen} \left(\omega_c t + K_\omega \int v_m(t) dt \right)$$

1) La amplitud de la señal de salida depende del valor de V_c y de ω_c ➔ **Es necesario que ambos sean constantes.**

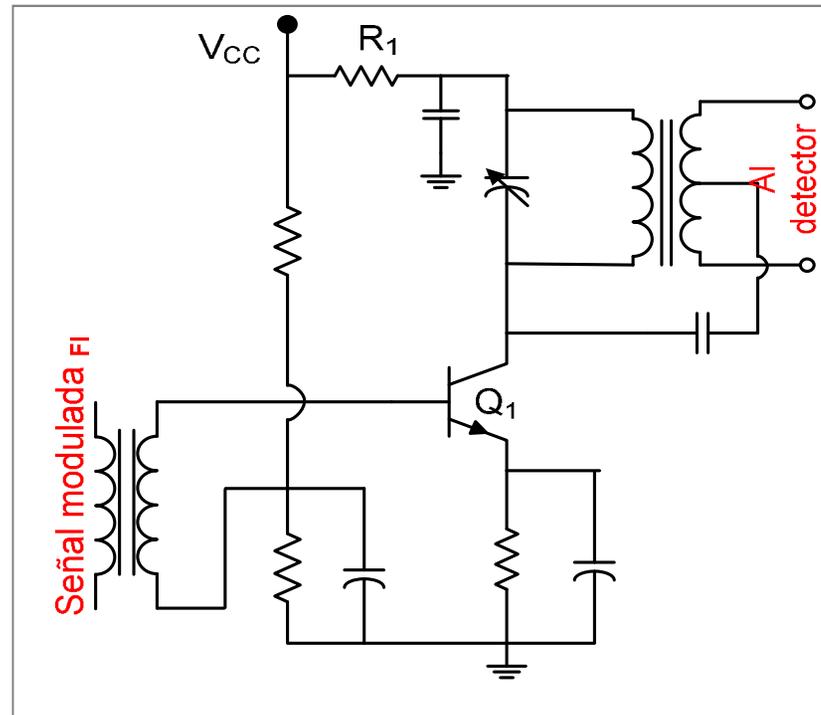
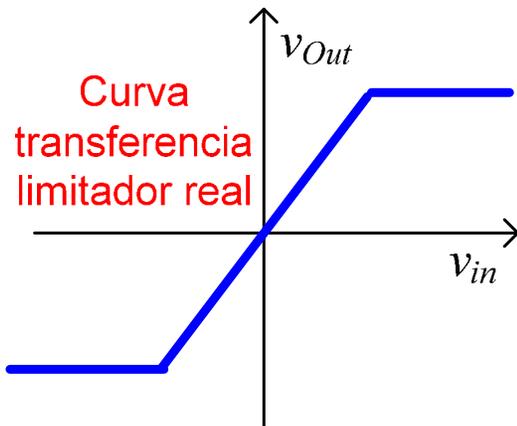
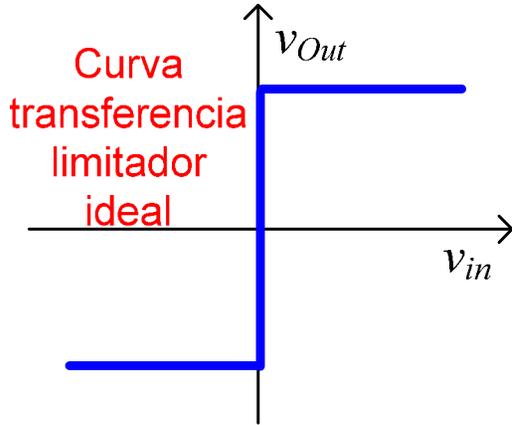
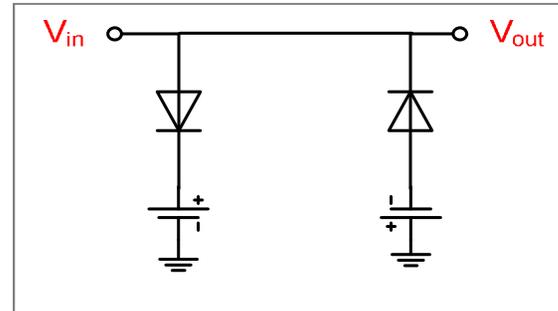
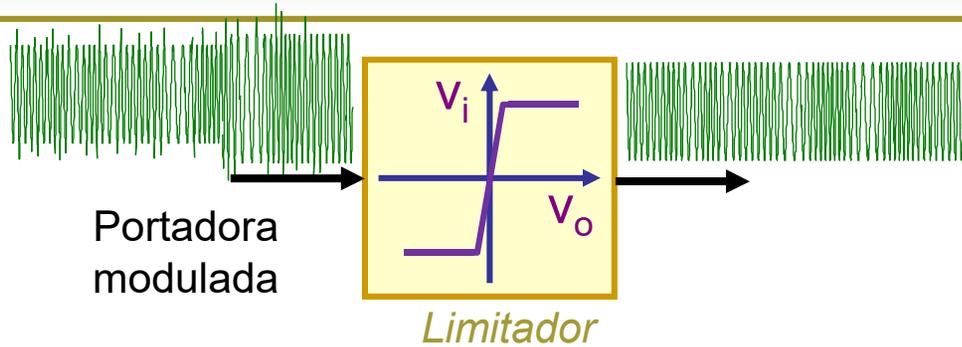
- La estabilidad de ω_c la fija el transmisor y el OL.
- V_c no llega constante al demodulador ya que se sumó ruido (distorsión) que afectó la amplitud de la señal de FM ➔ Es necesario poner un limitador

2) A la salida del derivador la señal está modulada en amplitud,  Para recuperar la información es necesario pasarla por un detector de AM, tal como el detector de envolvente.

Esquema general de un demodulador



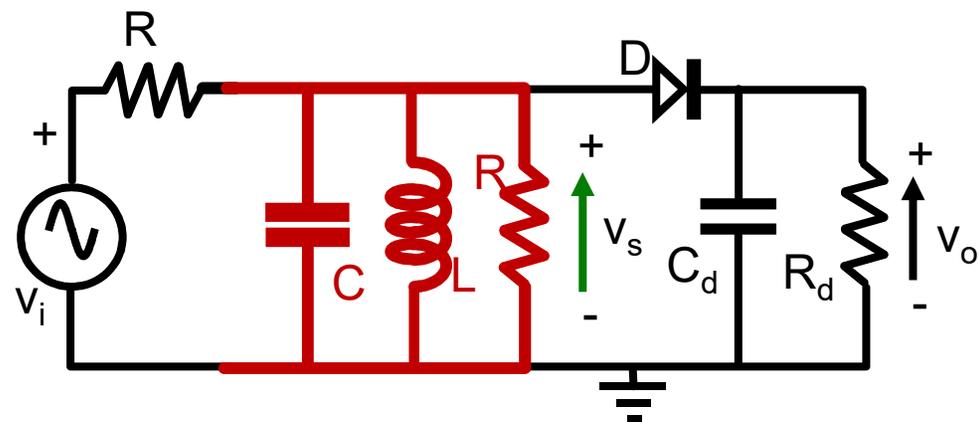
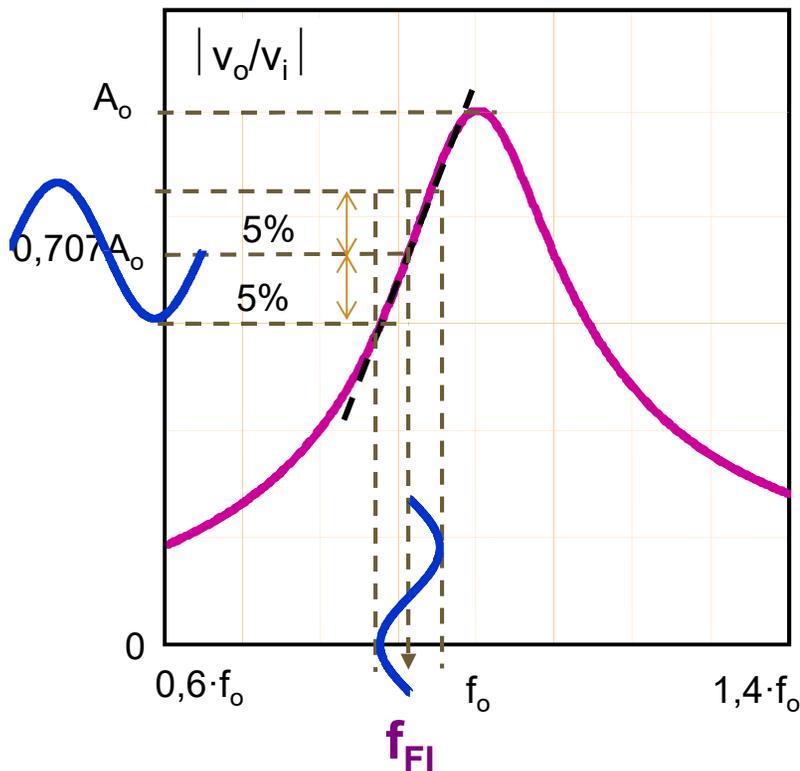
LIMITADORES



Q_1 trabaja entre corte y saturación para todas las señales de FI dentro del rango dinámico al que se diseña el receptor

- Trabaja en base a la conversión de variaciones de frecuencia en variaciones de amplitud.
- Produce una tensión de salida proporcional a la diferencia entre una frecuencia de referencia y la frecuencia de la señal de entrada.

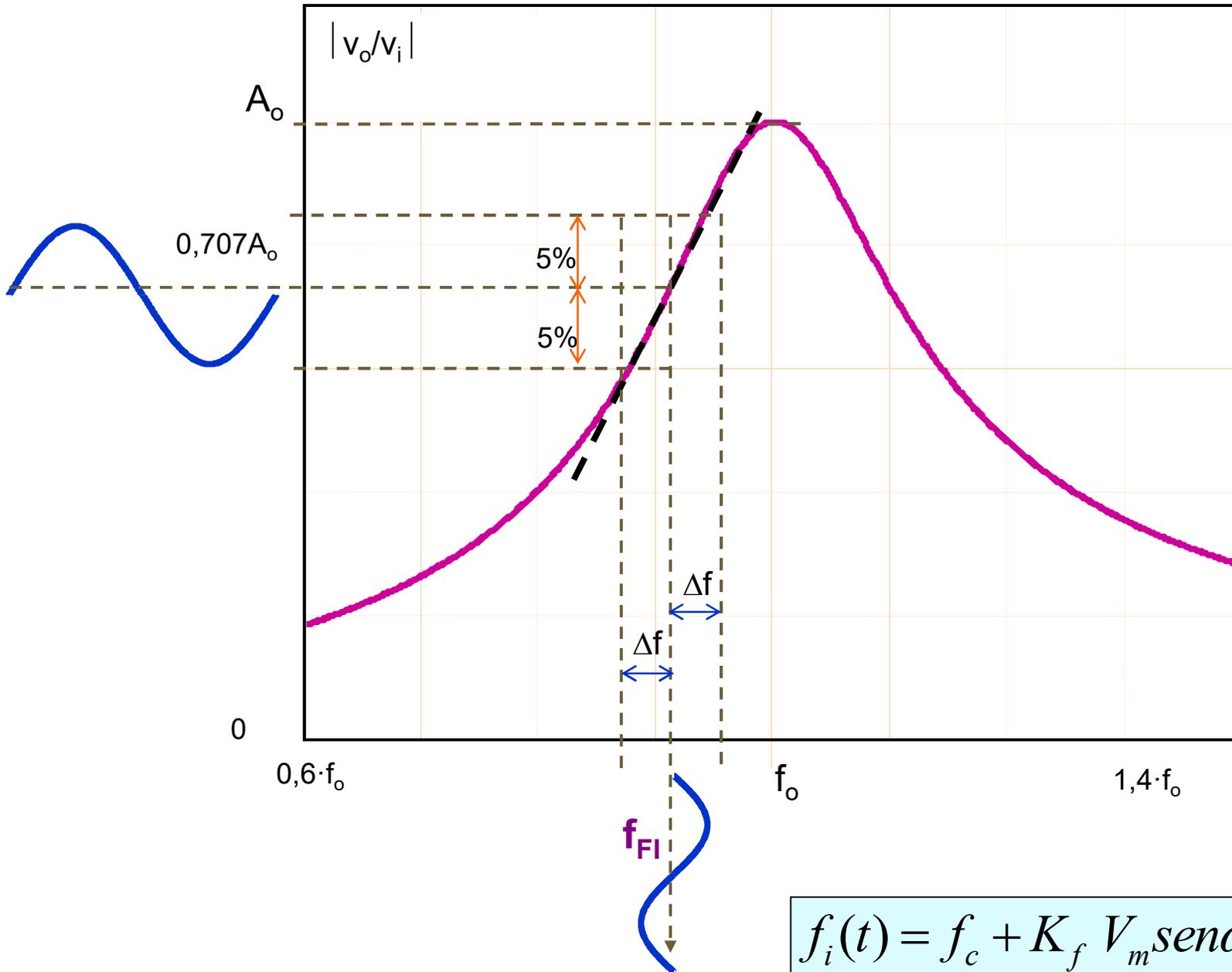
$$f_{iFM}(t) = f_c + K_f V_m \text{sen} \omega_m t$$



En zona lineal: Variaciones de ganancia proporcional a las variaciones de frecuencia

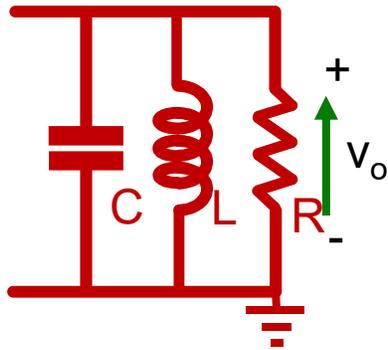
$$\frac{\Delta A}{\Delta f} = K_d = \text{constante}$$

DETECTOR DE PENDIENTE



$$f_i(t) = f_c + K_f V_m \text{sen} \omega_m t$$

- El circuito resonante se sintoniza a una frecuencia superior a la portadora.
- El circuito resonante produce una tensión de salida que es proporcional a la frecuencia de entrada.
- La portadora cae en uno de los flancos de la respuesta.
- Hay que controlar bien el Q del circuito, ya que del ancho de la campana depende del factor de calidad
- A la salida del circuito tanque, la información está en la envolvente de la señal.
- La señal AM presenta también una modulación FM que no interesa.



$$|y(f)| = \frac{1}{R} \sqrt{1 + 4Q_c^2 \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^2} \quad \varphi = \arctan \left(2Q_c \frac{\Delta f}{f_0} \right)$$

$$\left| \frac{A}{A_0} \right| = \sqrt{1 + 4Q_c^2 \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)^2}$$

$$f_{i \text{ FM}} = f_c + \Delta f$$

$$\Delta f = K_p V_m \cos \omega_m t$$

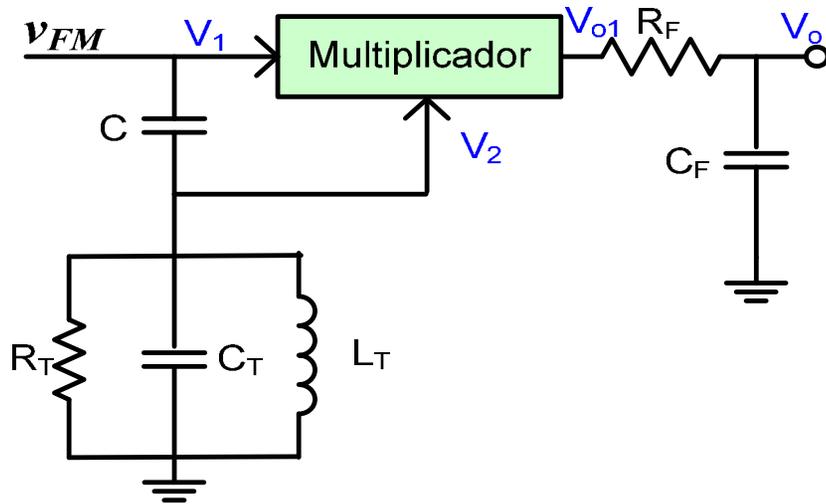
$$\Delta f_{\text{máx}} = K_p V_m$$

Ventaja del detector de pendiente:

- Simple
- Económico

Desventaja del detector de pendiente:

- Poco simétrico
- Difícil de ajustar
- Fuertes limitaciones ocasionadas por la no linealidad de la característica; son aproximaciones que se cumplen para pequeñas regiones de la característica.
- A mayor Δf , mayor alinealidad. No sirve para aplicaciones comerciales con Δf grandes (75KHz)
- Requiere etapa limitadora



El multiplicador es excitado por V_1 y V_2 , donde V_1 es:

$$v_{fm} = v_1 = V_c \cos[\omega_c t + m_f \cos \omega_m t]$$

$$v_1 = V_c \cos \varphi_1$$

La impedancia del tanque es:

$$Y_T = \frac{1}{R_T} \sqrt{1 + \left(2Q_c \frac{\Delta f}{f_0}\right)^2} \left[\text{tag}^{-1} \frac{2Q_c \Delta f}{f_0} \right]; \quad \theta = \text{tag}^{-1} \frac{2Q_c \Delta f}{f_0}$$

Considerando que C desfasa 90° y que el tanque desfasa θ , V_2 es:

$$V_2 = V_c \cos\left[\omega_c t + m_f \cos \omega_m t + \frac{\pi}{2} + \theta\right]$$

$$V_2 = V_c \text{sen}[\omega_c t + m_f \cos \omega_m t + \theta] = V_c \text{sen} \varphi_2; \quad \varphi_2 = \varphi_1 + \theta$$

V_1 y V_2 , ingresan al multiplicador:

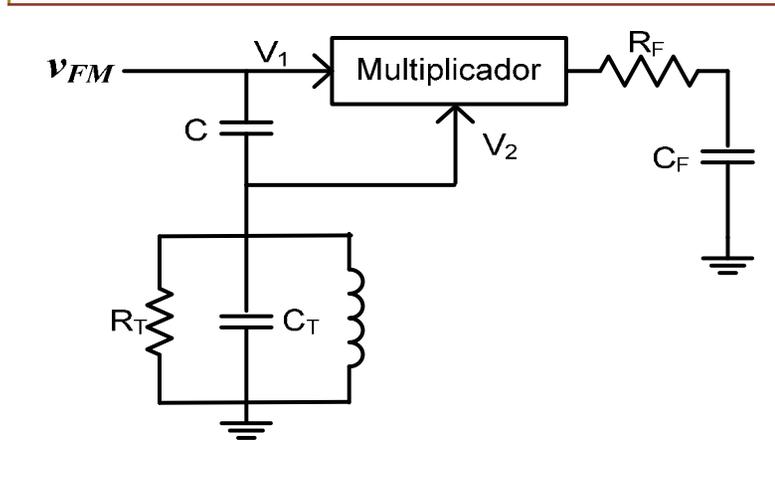
$$V_{o1} = V_1 \times V_2 = V_c \cos \varphi_1 \times V_c \text{sen} \varphi_2$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \theta$$

$$\text{sen} a \cdot \cos b = \frac{1}{2} \text{sen}(a+b) + \frac{1}{2} \text{sen}(a-b)$$

DETECTOR DE CUADRATURA

15



A la salida del multiplicador estarán presente los siguientes términos:

| Amplitud | Angulo | Frecuencia |
|----------------------|---|-------------------|
| aV_1 | φ_1 | fc |
| aV_2 | $\varphi_2 = \varphi_1 + \theta$ | $fc + \Delta f$ |
| $\frac{1}{2} bV_1^2$ | $2\varphi_1$ | $2fc$ |
| $\frac{1}{2} bV_2^2$ | $2\varphi_2 = 2\varphi_1 + 2\theta$ | $2fc + 2\Delta f$ |
| bV_1V_2 | $\varphi_1 + \varphi_2 = 2\varphi_1 + \theta$ | $2fc + \Delta f$ |
| bV_1V_2 | $\varphi_1 - \varphi_2 = \theta$ | Δf |

$$\varphi_1 = \omega_c t + m_f \cos \omega_m t$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \theta = \omega_c t + m_f \cos \omega_m t + \theta$$

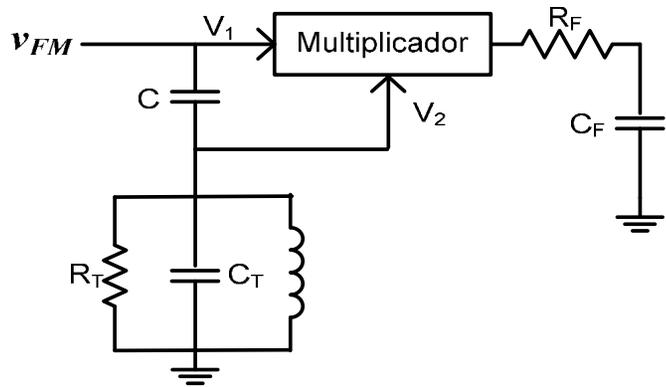
La salida del multiplicador pasa por un filtro pasa bajos:

$$V_o = bV_1 V_2 \text{ sen}\theta = b V_C^2 \text{ sen}\theta$$

Si θ es pequeño $\theta < 0,25 \text{ rad} \Rightarrow \text{sen}\theta \cong \theta$

Entonces

$$V_o = b V_C^2 \text{ tag}^{-1} \frac{2Q_c \Delta f}{f_o} \cong b V_C^2 \frac{2Q_c \Delta f}{f_o}$$



Donde f_o es la frecuencia central y por lo tanto:

$$V_o \cong \left(\frac{2bQ_c V_C^2}{f_o} \right) \Delta f \cong k_d \Delta f$$

$$V_o \cong k_d \Delta f = k_d x K_f V_m \cos \omega_m t$$

¡Ojo! V_o depende también de $V_C^2 \Rightarrow$ Hay que usar limitador

CONDICIONES DE DISEÑO

1) Para que el capacitor C, desfase 90° a la frecuencia de portadora, se debe cumplir:

$$X_C \geq 100R_T$$

2) La condición $\theta < 0,25 \text{ rad}$ implica

$$\frac{2Q_c \Delta f}{f_o} < 0,25$$

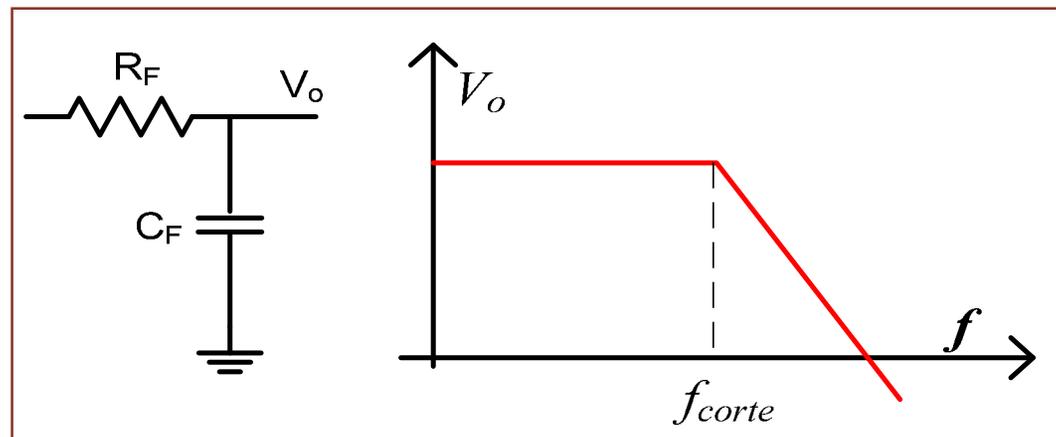
CONDICION DE LINEALIDAD

3) El tanque debe resonar a la frecuencia de portadora

$$\omega_o^2 L_T C_T = 1$$

$$Q_c = \frac{R_T}{\omega_o \cdot L_T}$$

4) Diseño del filtro:



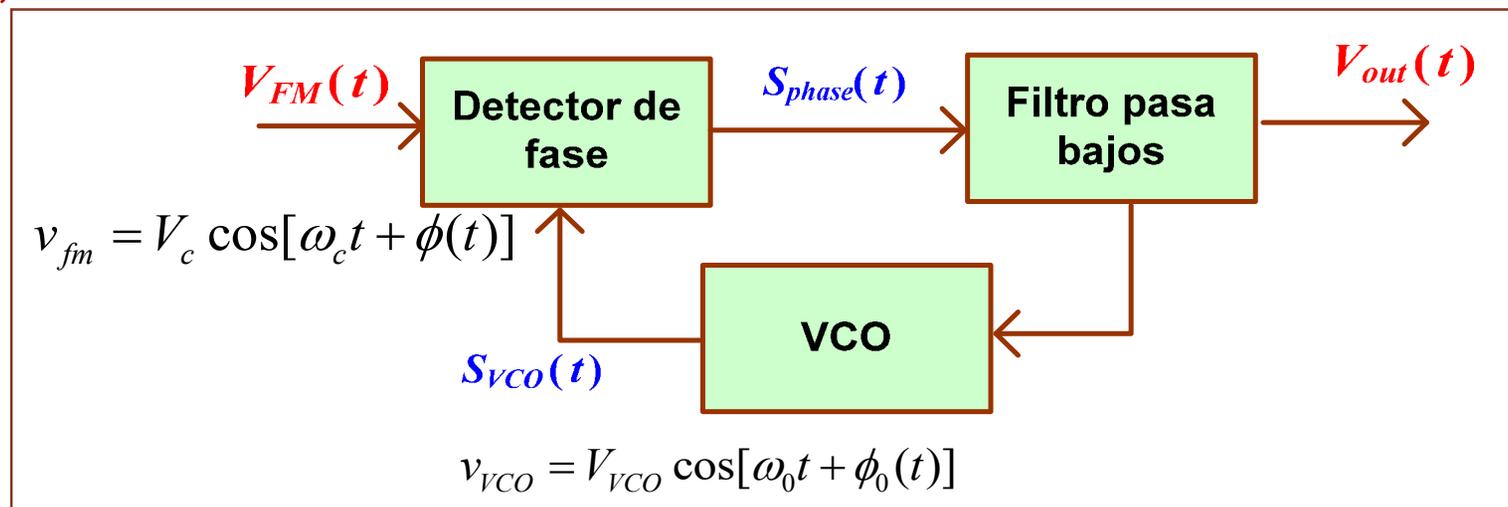
$$\tau_{filtro} = R_f \cdot C_f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{corte}}$$

$$f_{corte} \geq 20 f_{m \text{ máx}}$$

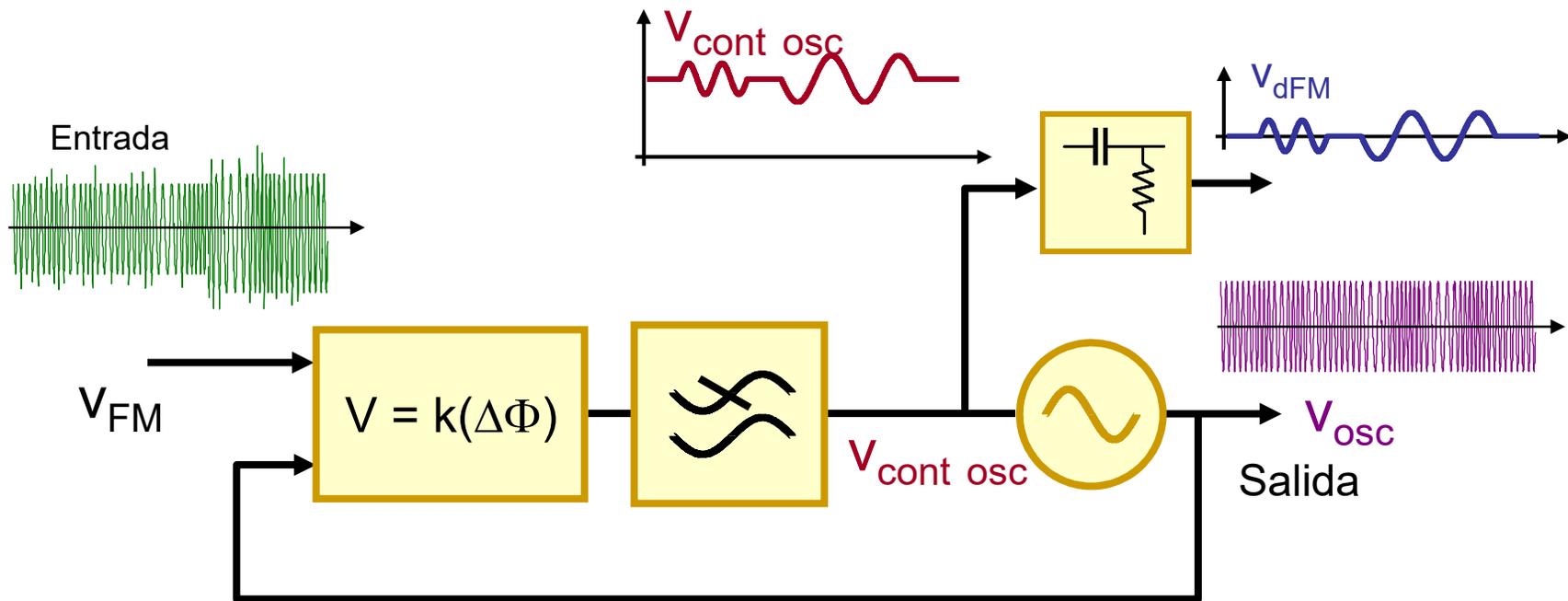
Principio de funcionamiento:

Un demodulador de frecuencia de PLL no requiere de circuitos sintonizados y automáticamente compensa los cambios en la frecuencia de la portadora debido a la estabilidad en el oscilador de transmisión

Si la entrada de PLL es una señal de FM desviada y la frecuencia natural del VCO es igual a la frecuencia central de FI, la tensión de corrección que se produce a la salida del comparador de fase y alimenta de nuevo a la entrada de VCO, es proporcional a la desviación de frecuencia y es, por lo tanto, la señal de la información demodulada.



Principio de funcionamiento:



Condición de diseño: el PLL debe ser suficientemente rápido para seguir las variaciones de frecuencia ➡

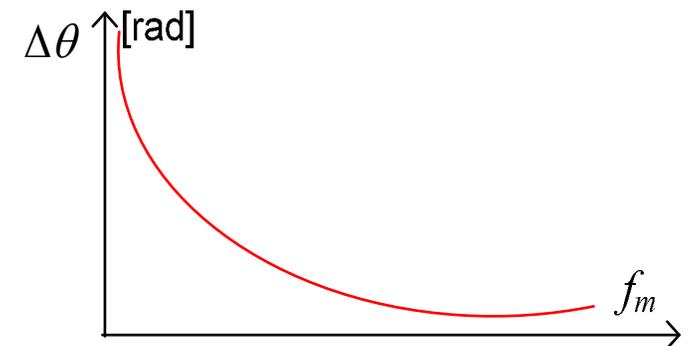
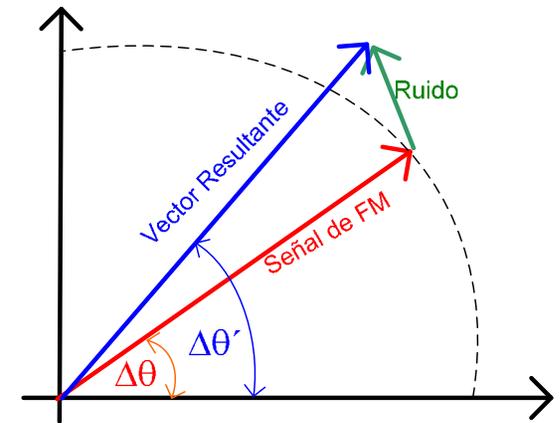
frecuencia de corte del PLL \gg frecuencia máxima de la moduladora

$$\omega_{corte\ PLL} \gg \omega_m\ max$$

- El ruido de alta frecuencia produce distorsión de amplitud y de ángulo
- La distorsión de amplitud no degrada la señal ya que la información no va en la amplitud
- Si afecta la distorsión del ángulo
- Cuanto mayor es el ángulo, menos afecta la distorsión.
- En FM los tonos altos se modulan menos

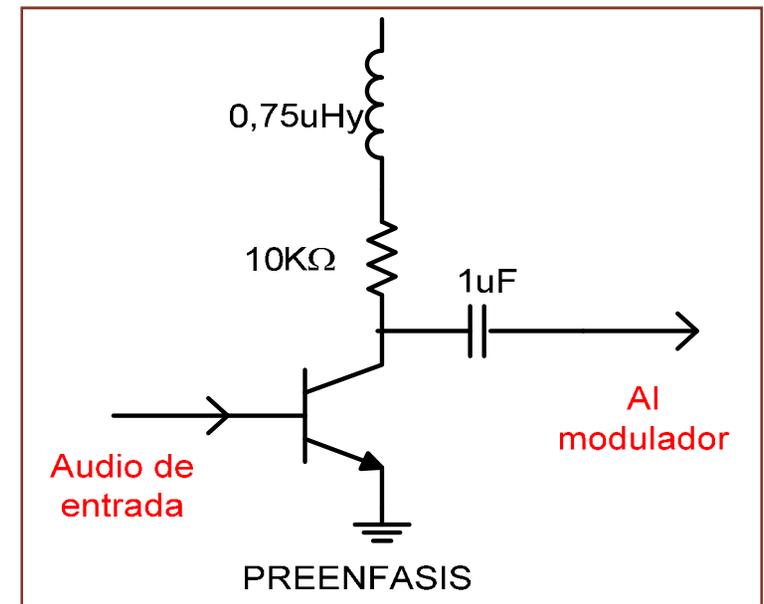
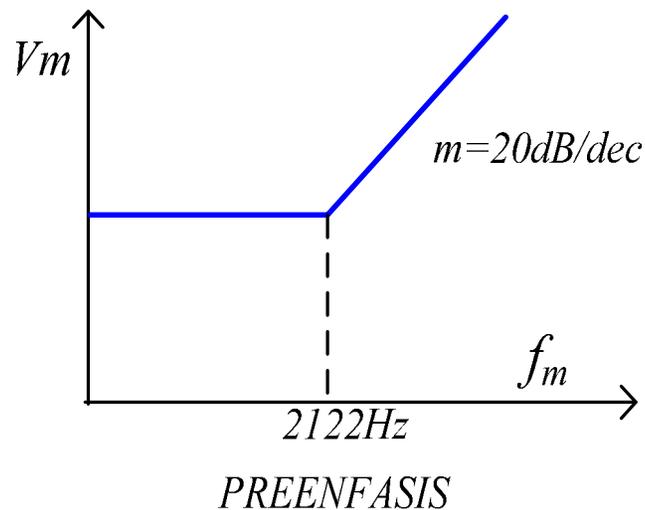
$$\Delta\theta = m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{K_f V_m}{f_m}$$

- Se podría evitar esto si Δf aumenta con f_m .
- Para aumentar Δf , se debe aumentar v_m . (Enfasis)
- Como en el transmisor se enfatizan los tonos altos, en el receptor se debe hacer el proceso inverso: deenfasis.
- El valor de la frecuencia de corte está normalizada



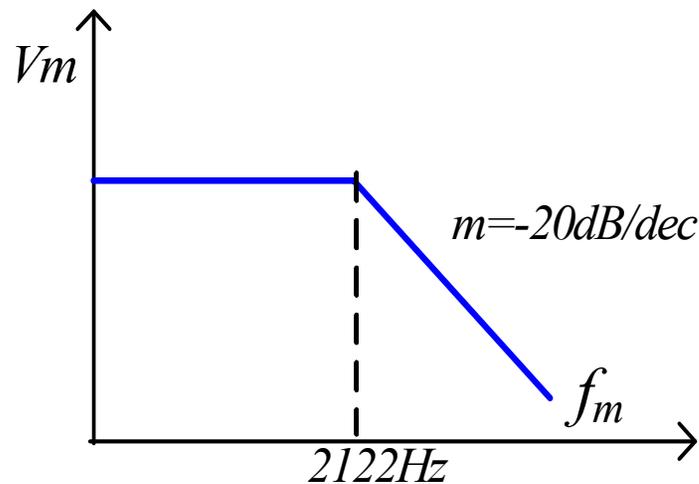
Preenfasis:

Las frecuencias de modulación (audio) más altas se acentúan en relación a las más bajas en forma previa a la modulación, de modo de producir una mayor desviación y lograr así un mayor nivel de señal recuperada en el extremo receptor.



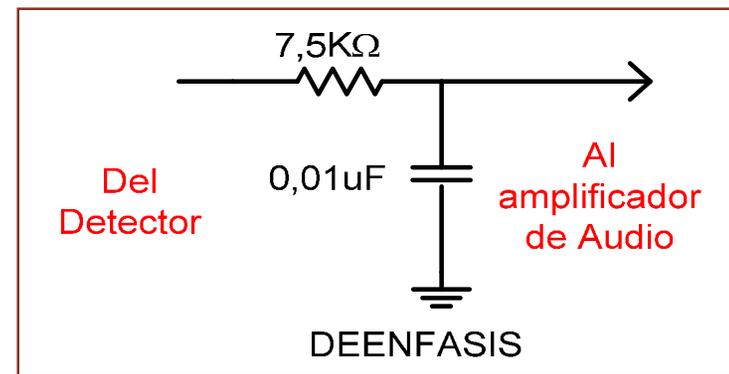
La respuesta del preénfasis corresponde a la de un filtro de paso alto

Como el Preenfasis altera la relación de amplitudes espectrales de la banda base (una forma de distorsión); la situación se resuelve con un DEENFASIS en el extremo receptor.



DEENFASIS

La respuesta del deénfasis corresponde a la de un filtro de paso bajo



$$\tau_c = RC = \frac{L}{R} = 75\mu\text{s}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 2,12\text{KHz}$$

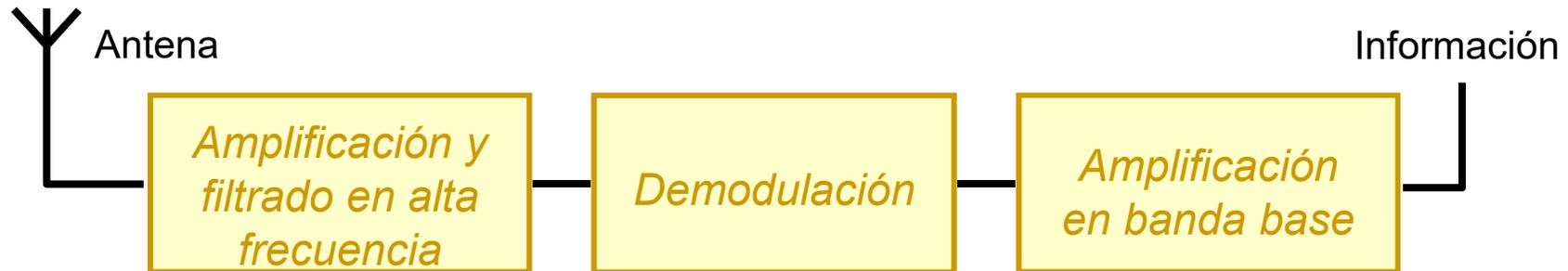
Observaciones:

Para que la relación de amplitudes sea correcta la acentuación (preénfasis) debe complementarse con la atenuación (deénfasis) y dado que ésta última es característica circuital del receptor se establece una norma para asegurar la complementación:

- Un preénfasis de transmisión de 75 [useg] (def. Standard correspondiente a la respuesta en frecuencia de un circuito filtro pasaaltos en la transmisión y pasabajos en la recepción) tanto para la radiodifusión FM como para el sonido de TV.
- Debe cuidarse que el preénfasis no produzca sobremodulación o desviación superior al máximo permitido
- Al efectuar el deénfasis en el receptor junto con atenuar las frecuencias altas, para volverlas a su amplitud correcta, se atenuará el ruido que las acompaña.

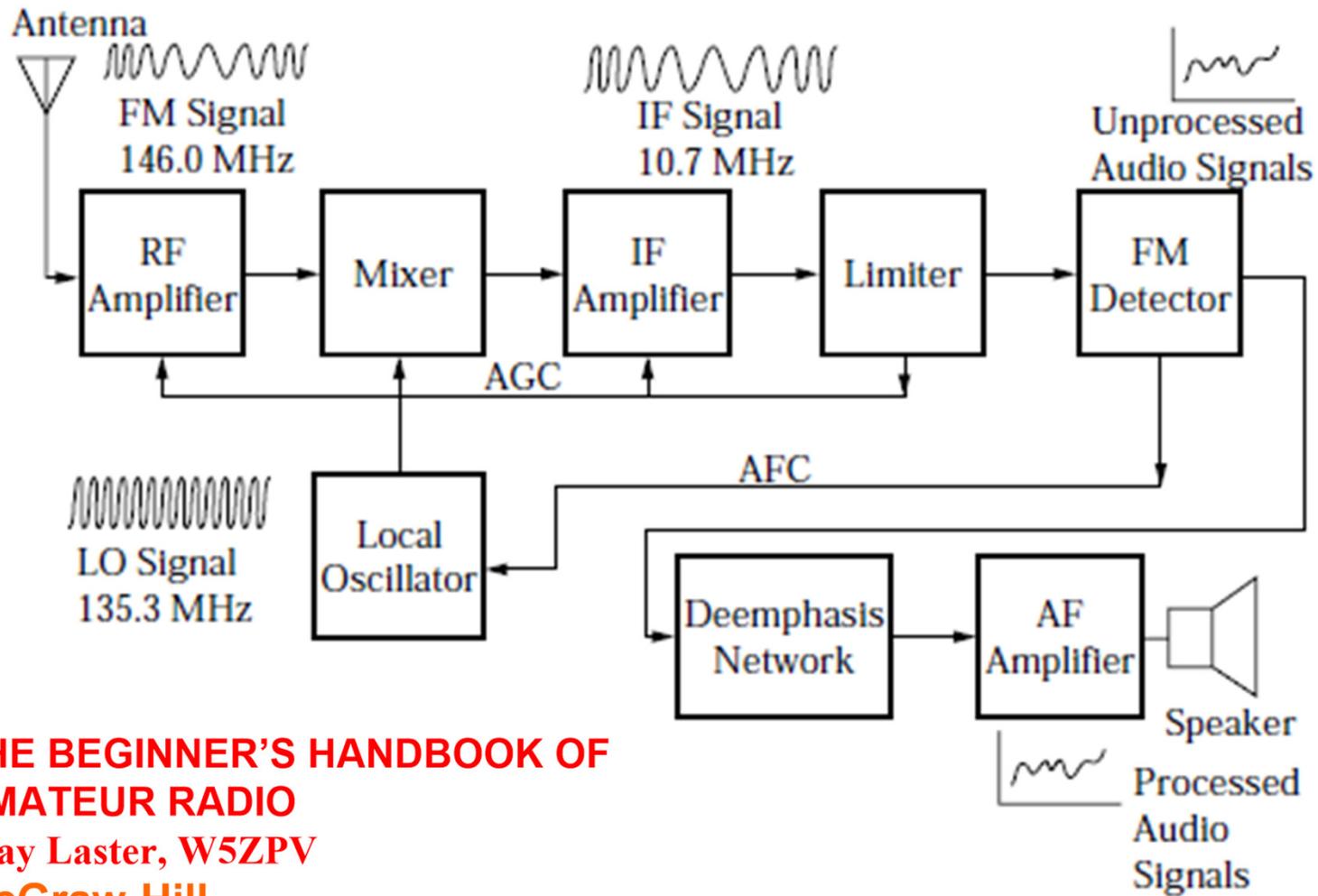
**Estructuras de
Receptores de señales
moduladas en ángulo**

- Los receptores que se utilizan para señales con modulación angular son muy similares a los que se usan para la recepción de AM o BLU convencional, excepto por el método utilizado para extraer la información de audio de la forma de onda de FI compuesta.
- En los receptores de FM, la tensión a la salida del detector de audio es directamente proporcional a la desviación de frecuencia en su entrada.
- Con los receptores de PM, la tensión a la salida del detector de audio es directamente proporcional a la desviación de fase en su entrada.
- Debido a que la modulación de frecuencia y de fase ocurren con cualquiera de los sistemas de modulación angular, las señales de FM pueden demodularse por los receptores de PM y viceversa.
- Por lo tanto, los circuitos usados para demodular las señales de FM y de PM se describen bajo el encabezado de "Receptores de FM.



Características de un receptor:

- **Sensibilidad:** capacidad de recibir señales débiles. Se mide como tensión en la entrada necesaria para obtener una relación determinada entre señal y ruido a la salida.
- **Selectividad:** capacidad de rechazar frecuencias indeseadas. Se mide como cociente de potencias de entrada de las señales de frecuencias indeseadas y de la deseada que generan la misma señal de salida.
- **Fidelidad:** Capacidad de reproducir las señales de banda base para una distorsión especificada.
- **Margen dinámico:** cociente entre niveles máximos y mínimos de potencia de entrada que garantizan funcionamiento correcto del receptor.



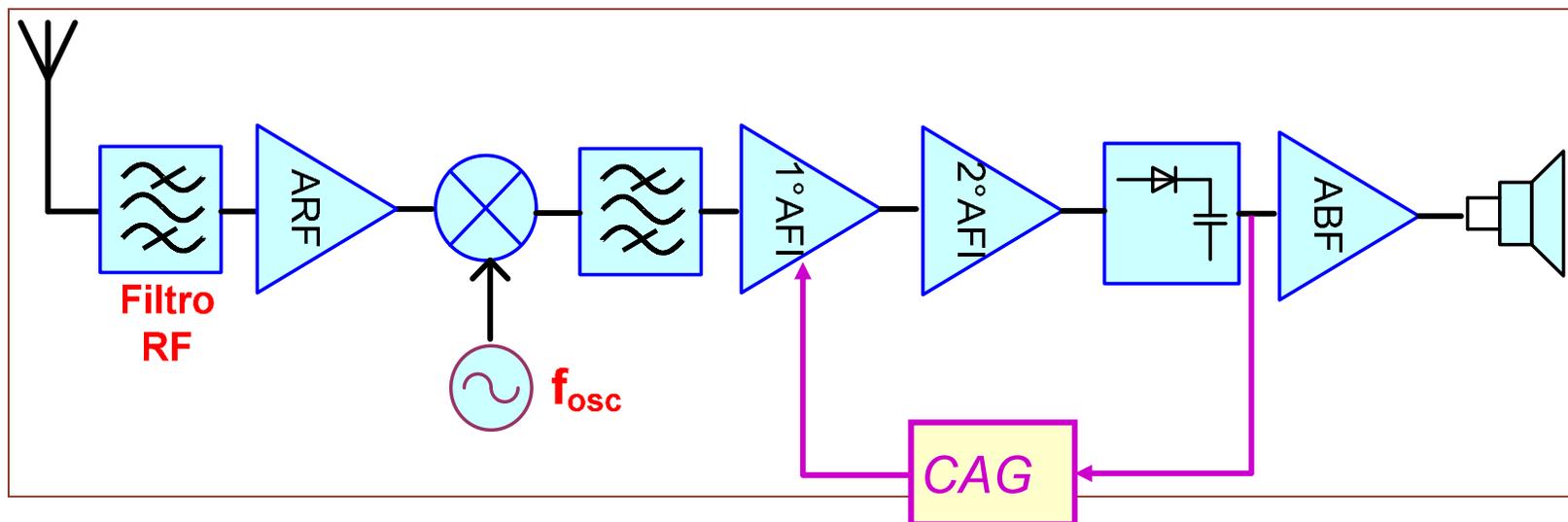
**THE BEGINNER'S HANDBOOK OF
AMATEUR RADIO**
Clay Laster, W5ZPV
McGraw-Hill

Block diagram for a typical FM receiver using the superheterodyne concept. This design is applicable for most FM receiver requirements: broadcast band (88–108 MHz), commercial radiotelephone, and amateur operation on authorized FM emissions on the amateur bands.

- El control automático de ganancia (AGC o CAG)
- El control automático de frecuencia (AFC o CAF)
- El silenciador o “squelch”

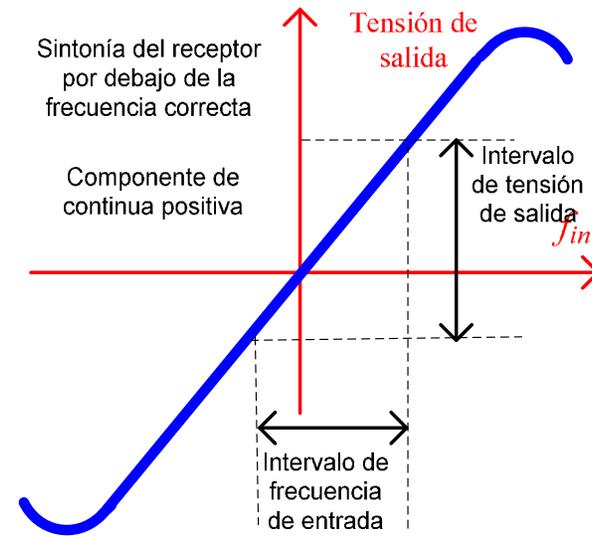
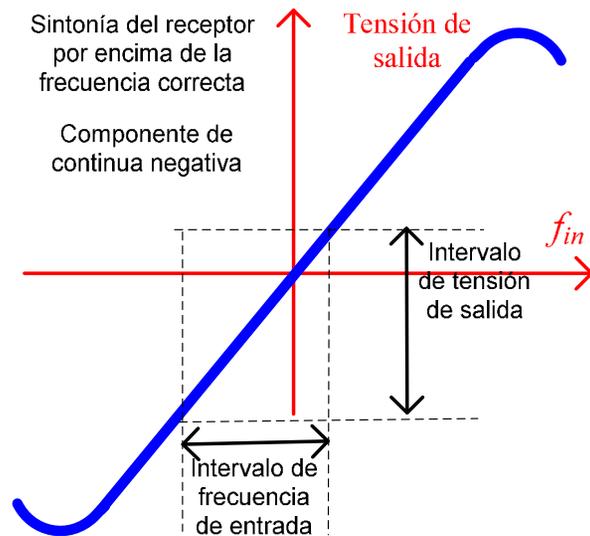
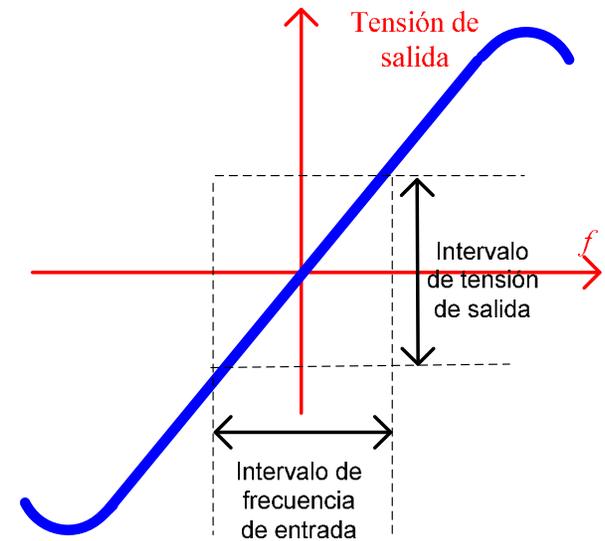
Control Automático de Ganancia - AGC

- Con el objeto de lograr potencia constante en la entrada del detector y en la salida, se controla la ganancia de las etapas de FI en razón inversa con la amplitud de las señales de entrada al AFI.
- Para ello se toma de la salida del detector una señal de continua que se inyecta en la 1° etapa de FI a fin de controlar el punto de polarización de la misma en función de la tensión inyectada.

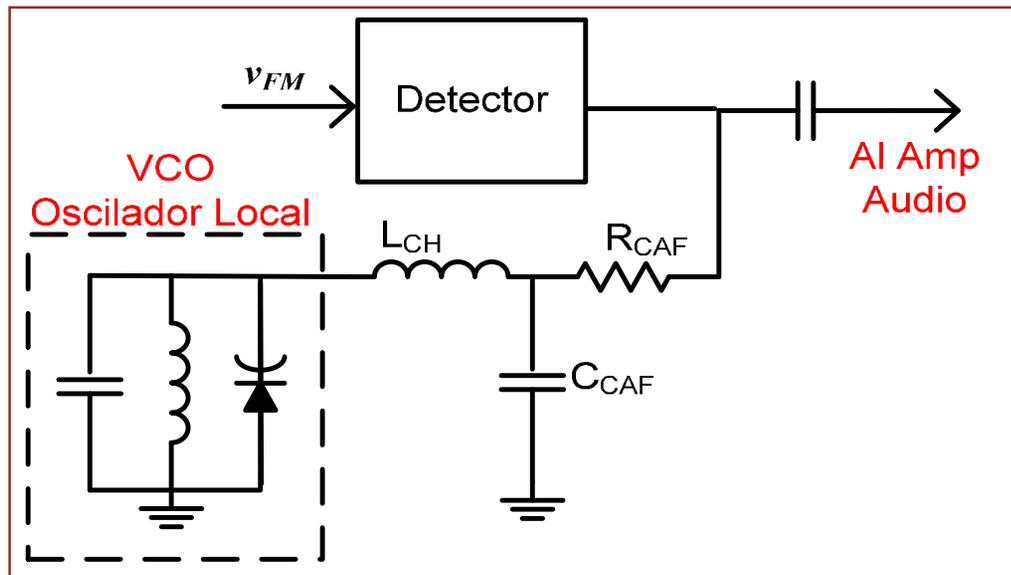


Corrige las variaciones de frecuencia indeseadas que se producen en el oscilador local, para que este no se aparte de la estación que se sintonizó.

Cuando la sintonía es correcta la salida del demodulador varia en forma simétrica y no tiene salida de DC.



La componente de continua de la salida del demodulador, se aplica sobre el diodo varicap para corregir la frecuencia de salida del OL. Una tensión negativa causa que disminuya la frecuencia a la que se sintonizó el receptor y viceversa



Diseño del CAF

$$\tau_{CAF} = R_{CAF} C_{CAF} \approx 0,2 \text{ seg}$$

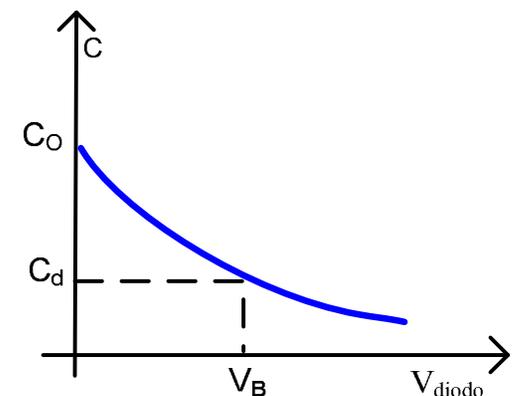
$$X_{LCH} = \omega_{VCO} L_{CH} \gg R_{CAF}$$

$$X_{C_{CAF}} = \frac{1}{\omega_{VCO} C_{CAF}} \ll R_{CAF}$$

$$X_{C_{CAF}} = \frac{1}{\omega_m C_{CAF}} \gg R_{inAudio}$$

VCO con Diodo Varicap:

- Capacidad variable según la tensión que se aplica en sus bornes
- V_B se diseña para que el oscilador esté a la frecuencia correcta: $f_{OL} - f_C = FI$



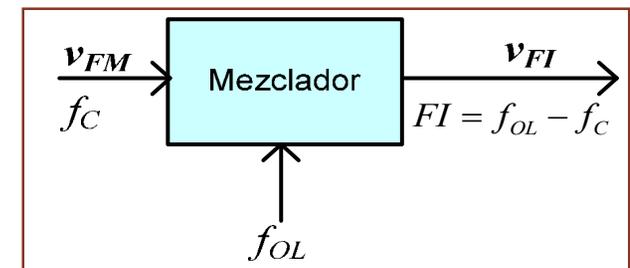
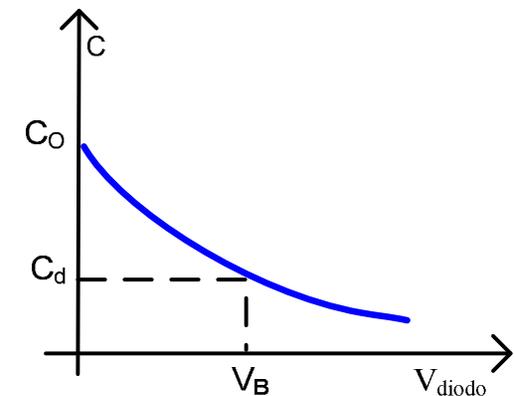
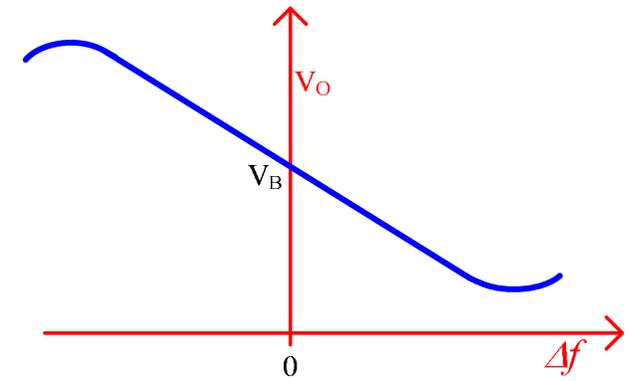
- La frecuencia de salida del VCO es:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L(C + C_d)}}$$

- Si la tensión aumenta, entonces la capacidad disminuye y luego la frecuencia de salida del VCO aumenta.

Funcionamiento del CAF:

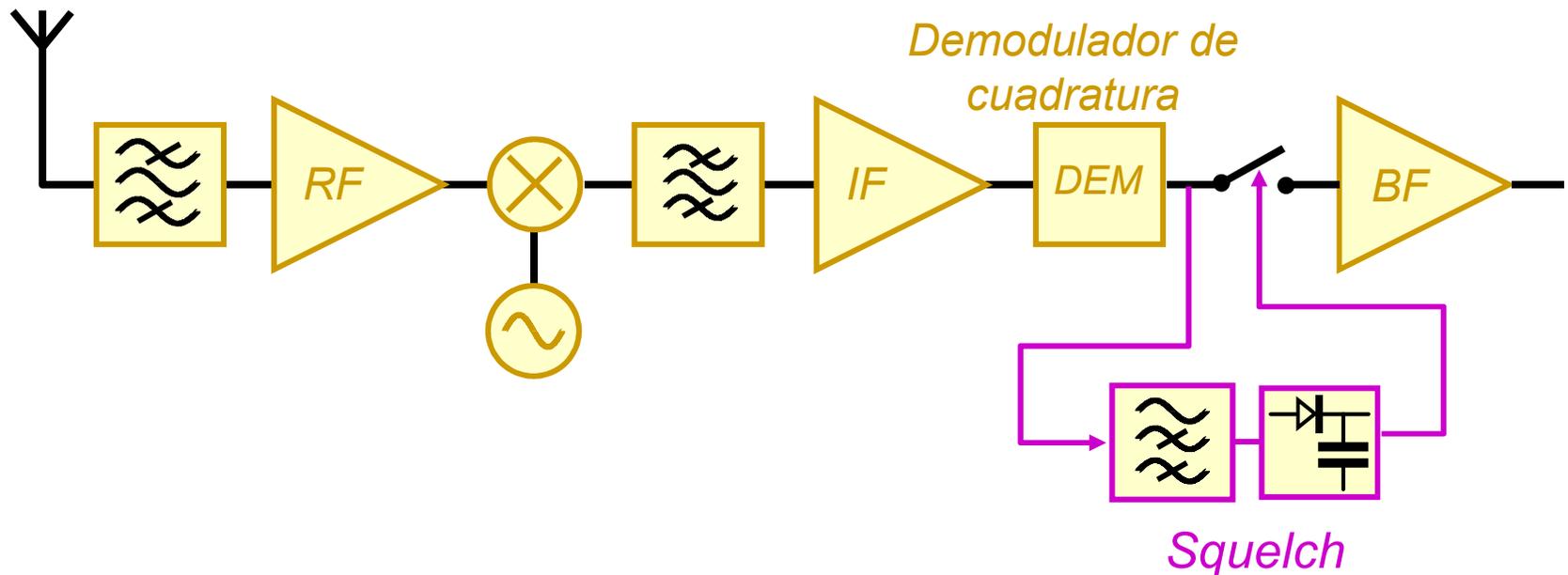
- Si el oscilador entrega una frecuencia mayor a la correcta entonces $f_o > f_c$, ya que :
 $f_{OL} - f_c = FI$
- Si la frecuencia central es mayor que 10,7MHz el discriminador entrega una tensión de CD negativa.
- Luego C_d aumenta, lo que provoca que f_{OL} disminuya.
- De esta manera el CAF “jala” al receptor a casi la frecuencia correcta



El silenciador o “squelch”

32

Se utiliza en receptores de transmisiones en VHF y UHF moduladas en FM. Silencia el amplificador de audio cuando no hay señal de RF para evitar el “soplido” o ruido de fondo, con objeto de evitar las molestias que causa y para ahorrar consumo.



Se detecta la presencia del “soplido” por filtrado “pasa altos” y detección de envolvente. Si existe soplido, se silencia el amplificador de baja frecuencia. Si existe señal de RF entonces no existe el soplido y, por tanto, no se silencia el amplificador de baja frecuencia. El filtro “pasa-bajos” no debe dejar pasar las señales de la frecuencia de la moduladora.