

RECEPTORES DE FM

Los receptores de **FM** son aquellos capaces recibir y demodular señales moduladas en **Fase** o **Frecuencia**. Las diferencias mas importantes que presentan estos receptores de **FM** respecto de los de **AM** son las siguientes:

- 1 - Anchos de bandas de FI mayores.
- 2 - Limitadores de amplitud.
- 3 - Demoduladores de frecuencia o fase.
- 4 - Posibilidad de multiplexado estereofónico en servicio de radiodifusión.

El diseño de un receptor de **FM** básicamente es el mismo que para un receptor de **AM**. En receptores de **FM** no es necesario que haya linealidad en las etapas anteriores a la detección, en realidad, es más ventajoso trabajar a estas etapas en zonas de limitación (saturación), consiguiendo de esta forma eliminar variaciones de amplitud y ruido de fondo. Por otro lado el demodulador debe ser capaz de convertir las variaciones de frecuencia o fase de la señal de entrada en variaciones de amplitud. Esto se podría conseguir en forma simple en un receptor de **AM**, para esto se sintoniza el receptor de forma tal que la frecuencia de portadora se ubique a mitad de recorrido, en uno de los lados de la curva de selectividad. Cuando la frecuencia de señal varia con la modulación, la misma oscila y da como resultado una salida cuya amplitud varia con el corrimiento de frecuencia, esta luego se demodula como una señal de **AM**.

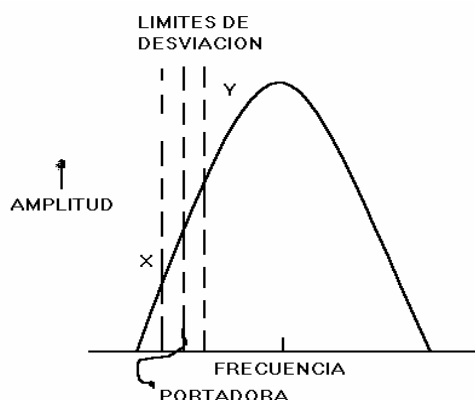
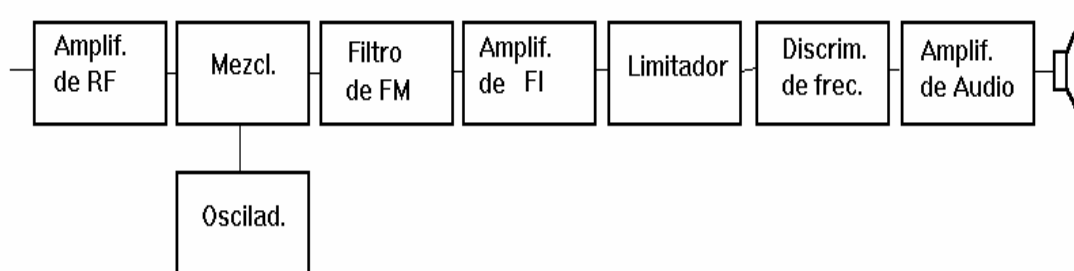


Fig. N° 9 - 26

Con receptores que tienen curvas de selectividad de lados empinados, este método no resulta muy satisfactorio ya que la distorsión se hace severa, a menos que la desviación de frecuencia sea reducida, pues la desviación de frecuencia y amplitud de la salida son lineales sólo sobre una parte reducida de la curva de selectividad.

El Receptor de FM

El diagrama en bloques de un receptor de **FM** se simple conversión se lo puede ver en la figura siguiente:

**Fig. N° 9 – 27**

Fundamentalmente para lograr una sensibilidad menor que $1\ \mu\text{V}$, un receptor de FM requiere una ganancia de varios millones, valor demasiado elevado para mantener la estabilidad en una sola frecuencia, esto es sin utilizar una traslación de frecuencia, en este caso de amplifica y demodula directamente a la frecuencia de recepción. Por este motivo en la practica se utilizan en los receptores de FM circuitos del tipo Superheterodino. Comparando los diagramas en bloques de un receptor de AM con uno de FM, surgirán tres diferencias fundamentales: el receptor de FM emplea un Filtro de mayor ancho de banda, el detector es diferente, y se ha agregado una etapa limitadora entre el amplificador de FI y el detector. Por lo demás, las funciones, y a menudo los circuitos correspondientes a las etapas de RF, oscilador, mezclador y de audio serán exactamente iguales en ambos receptores.

Durante la operación, la diferencia notable entre los dos receptores es el efecto del ruido y la interferencia sobre una señal que se recibe.

Desde las primeras épocas la interferencia ha sido uno de los problemas mas importantes que deben superar los receptores aficionados. Las etapas limitadoras y discriminadoras son capaces de eliminar gran parte del ruido, excepto el que se enmascara de manera que adquiere la característica de una modulación de frecuencia. El sistema de FI del receptor y la sintonía del detector de fase deben estar exactamente alineados para lograr una buena supresión del ruido. Los receptores de FM funcionan de manera especial cuando se presentan interferencias, exhibiendo una característica conocida como efecto de captura. Esto significa que la única señal recibida demodulada será la señal de mayor intensidad, aun cuando no sea mucho mas fuerte que las de otras estaciones recibidas.

Ancho de Banda: El ancho de banda que deben presentar los receptores de FM, es un parámetro que se encuentra normalizado, este es muy variado y depende del tipo de servicio al que se destinará el receptor. En receptores de radiodifusión se requiere un ancho de banda de 200 Khz., en receptores de telefonía (Banda Angosta) se requiere un ancho de banda de 15 Khz ó en algunos casos 12,5 Khz. Además de estas características de ancho de banda pasante, el rechazo de señales de canales adyacentes es también una función que debe cumplir la etapa de FI, para esto utiliza una serie de filtros cerámicos o a cristal de respuesta adecuada.

En la mayoría de los receptores de FM antiguos, la selectividad necesaria de la etapa de **FI** se lograba utilizando un cierto numero de circuitos sintonizados de doble sintonía. El amplio ancho de banda y la característica de respuesta en fase que requiere el sistema de FI hace necesario que todos los transformadores sintonizados utilizados sean cuidadosamente diseñados y alineados.

En la actualidad, el uso de filtros de alta selectividad con un bajo ripple en la banda pasante, simplifica en forma importante la tarea de diseño y alineación de estos receptores. Se dispone de filtros Monolíticos a Cristal ó Cerámicos de bajo costo y con prestaciones muy variadas, estos filtros generalmente se colocan en el receptor a la salida del primer mezclador.

Un aspecto importante a tener en cuenta, es la elección del ancho de banda para la etapa de FI del receptor. En general este se debe seleccionar de forma tal que no sea demasiado grande comparado con el ancho de banda de la señal recibida, en caso se utilizar un ancho de banda mayor que el necesario se puede producir una degradación de la **SNR**. Un receptor de banda ancha puede recibir señales de banda angosta, sufriendo alguna pérdida en el nivel del audio demodulado, pero una señal de banda ancha se vera seriamente distorsionada si es recibida en un receptor preparado para recibir FM banda angosta.

Limitador: Cuando se introdujo por primera vez la FM, el punto principal utilizado como argumento de venta fue la posibilidad de recepción libre de ruido. Algunos circuito presentes en el receptor de FM tiene la función de eliminar el ruido y la modulación en amplitud que puede contener la señal recibida, para esto se dispone de una etapa denominada limitadora. La mayoría de los detectores en uso tienen la misión de limpiar la señal de modo que solo se demodule la modulación en la frecuencia deseada. Las etapas limitadoras se diseñan con transistores o Circuitos Integrados construidos especialmente para este fin.

Como se ve en la figura siguiente, la señal de entrada se limita en amplitud cuando la señal ingresante presenta un nivel lo suficientemente grande como para llevar a la saturación el funcionamiento en la etapa limitadora, produciendo una señal de salida de amplitud constante.

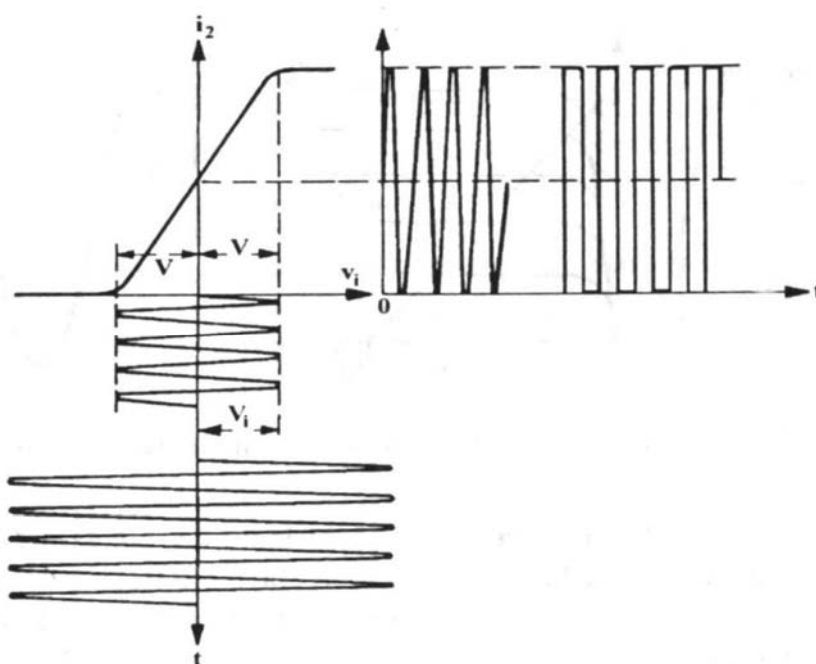
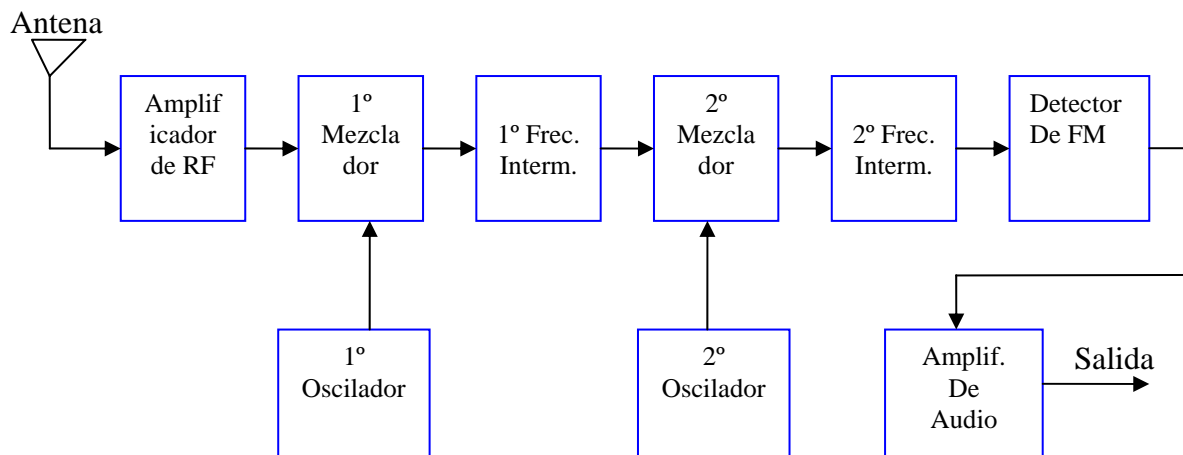


Fig. N° 9 – 28

Obviamente para asegurar un corte pleno se requiere que la señal de entrada presente un nivel mínimo de tensión, por debajo del cual el limitador no trabaja. Este nivel de entrada de limitación depende del tipo de limitador y del elemento activo que se utilice, por ejemplo para el caso de un C.I. como el MC 3361 ó MC 3371 ó MC 3372, el nivel de entrada de limitación es de aproximadamente 2,6 μ v.

Los receptores de FM utilizados en forma mayoritaria en la actualidad para frecuencia elevada (por encima de 100 Mhz.) son de doble conversión, como el visto anteriormente, cuyo diagrama en bloque es el siguiente:

**Fig. N° 9 - 29**

La diferencia con el receptor de AM radica fundamentalmente en la etapa de FI y el demodulador. Para receptores de FM la etapa de FI incluye:

- 1 - Filtros de banda de rechazo de señales de canal adyacente especial.
- 2 - Amplificador de alta ganancia de FI..
- 3 - Limitador de amplitud.

Los anchos de banda amplios requeridos por las señales moduladas en ángulo, y la necesidad de limitar la amplitud de la señal de FI antes de la detección (pues la mayoría de los detectores responde a las variaciones de amplitud y de frecuencia o fase), hicieron necesario el uso de técnicas de diseño especializadas, como transformadores sintonizados por etapas y limitadores de etapa múltiple. Las funciones mas importantes que debe cumplir la etapa de FI son la de rechazar las señales de canales adyacentes y amplificar lo suficiente a la señal de entrada para que pueda ser demodulada satisfactoriamente.

Las frecuencias de FI (o al menos la ultima frecuencia de FI en el caso de sistemas de conversión múltiple), son generalmente mayores que en los receptores de AM. Por ejemplo, las frecuencias más comunes son 10.7 Mhz, 21,4 Mhz, 45 Mhz, 70 Mhz, 90 Mhz para la primer conversión y 455 Khz para la segunda conversión en sistemas de FM banda angosta. La mayor frecuencia de uso de los sistemas de FM, hacen necesario el uso de una **FI** mas elevada, esto es para facilitar los requerimientos de diseño del amplificador de RF (rechazo de frecuencia Imagen).

El filtro a utilizar en la etapa de **FI**, debe presentar un corte abrupto para rechazar señales de canal adyacente, pero al mismo tiempo, para evitar distorsión, debe exhibir linealidad de fase en la banda de paso.

La distorsión de fase en sistema de FM es equivalente a la distorsión de amplitud en los de AM, esta se produce cuando las relaciones de fase relativas entre la portadora de FM y las bandas laterales se alteran, esto perturba la recuperación exacta de la forma de onda moduladora. Si el sistema de FI global (circuitos sintonizados, filtros y amplificadores) presenta una función de transferencia cuya fase decrece linealmente con la frecuencia, este amplificará las señales de FM sin distorsión de fase, esto puede demostrarse matemáticamente, en forma intuitiva, se puede argumentar que una red con característica de fase que decrece linealmente, introduce simplemente un retardo independiente de la frecuencia y permitirá el paso de la portadora y las bandas laterales sin cambio en sus fases relativas.

Un sistema típico de FI moderno se basa en el uso de circuitos integrados especialmente diseñados para este uso, ya sea en sistemas de banda ancha y simple conversión o

en sistemas de banda angosta y doble conversión, el diagrama en bloques de una etapa de FI de simple conversión de este tipo se ve en la figura siguiente:

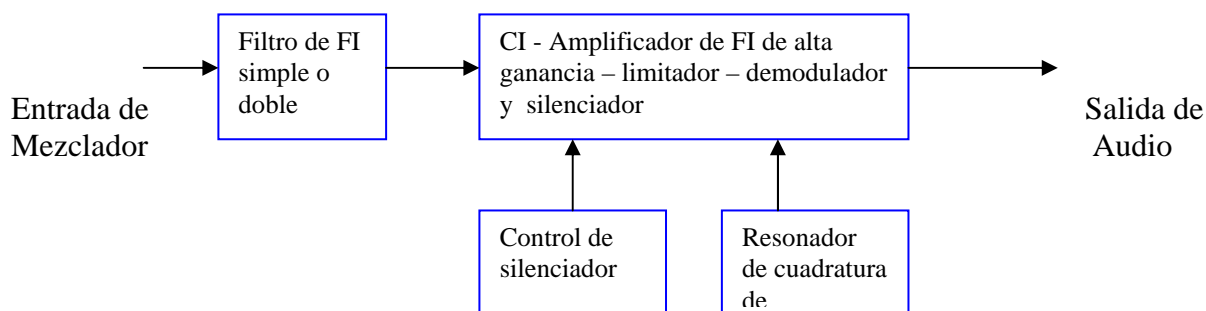


Fig. N° 9 – 30

En este caso la salida de la etapa mezcladora se aplica al filtro de FI, este en caso de ser el receptor de banda ancha será un filtro Cerámico y en caso de ser de banda angosta será a Cristal, esta etapa puede ir acompañada de un amplificador a transistores que compensa la pérdida de inserción del filtro. La señal de salida de este bloque se aplica al circuito integrado el cual dispone de un amplificador de gran ganancia, un limitador y el demodulador, la bobina o resonador de cuadratura es externo al CI. Muchos circuitos integrados incluyen el silenciador, siendo solo necesario colocar en forma externa el regulador de nivel de silenciamiento.

En el caso de una etapa de FI de doble conversión con circuitos integrados el diagrama en bloques sería:

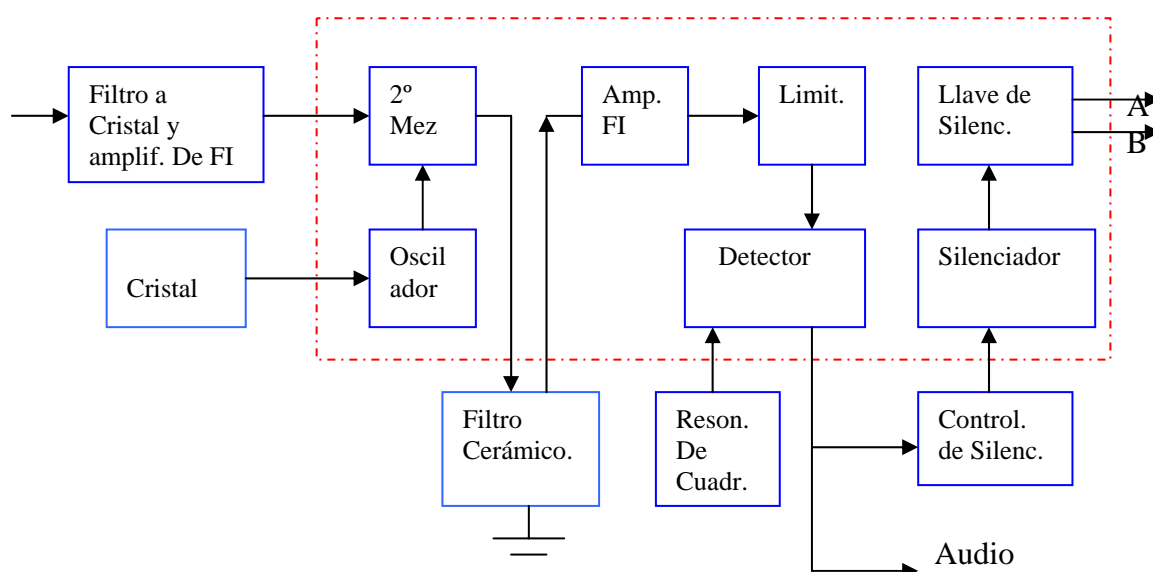


Fig. N° 9 – 31

El diagrama en bloques anterior constituye la totalidad de la etapa de FI, la señal que ingresa proviene del primer mezclador, el primer bloque constituye el primer filtrado, generalmente utiliza filtros monolíticos a cristal seguidos de un amplificador con transistores, estos deberán suministrar un rechazo de las señales de canal adyacente del orden de 40 a 60 dB, según el caso.

La frecuencia del cristal exterior depende del valor de la 1º FI y del valor de la 2º FI, la salida del mezclador interno se hace pasar por un filtro externo, generalmente cerámico, el

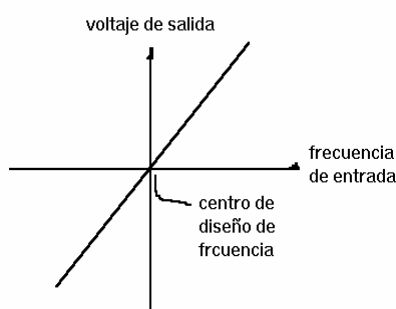
cuál contribuye en la atenuación de las señales de frecuencias de canales adyacentes. La salida de este filtro se inyecta a el amplificador de FI interno, este provee suficiente ganancia para que pueda trabajar el limitador. Se logra obtener una limitación fuerte excitando las ultimas etapas de amplificación hasta la saturación y corte, esto es para todas las señales de FI dentro del rango dinámico a que se destina el receptor. El resultado es que la señal que se inyecta al detector, procedente del ultimo amplificador de FI, es una onda cuadrada de frecuencia modulada.

Las especificaciones de detector publicadas por los fabricantes, listan los voltajes requeridos para diversas características de salida, tales como SNR, salida de audio recuperada y limitación. La potencia de entrada mínima requerida para las operación satisfactoria del detector y la potencia de entrada disponible, procedente de la antena, bajo las condiciones de señal mínima deseada, determina la ganancia global requerida entre las terminales de antena y detector el diseñador debe prorratar esta ganancia entre el amplificador de RF, el mezclador y el sistema de FI. La operación de detector utiliza un resonador ya sea compuesto por un circuito resonante LC o un resonador cerámico, en los dos casos este elemento es externo al CI.

El CI incluye el circuito completo para que opere el control de enmudecimiento (Squelch), se incluye el filtro pasabanda, un comparador de tensión y dos llaves que operan en sentido contrario una de otra, salidas A y B.

Supongamos que la señal mínima de recepción disponible en el conector de entrada del receptor es de $0.2\mu\text{V}$, aplicada a una impedancia de entrada (50Ω) presentada por el amplificador de RF, si la etapa detectora requiere un nivel de 1mV sobre una impedancia de $40\text{k}\Omega$, para limitación completa, las etapas intermedias del receptor deberán procesar la señal a fin de esta cumpla con los requerimientos anteriores. Se deberán tener en cuenta las perdidas de los diversos filtros utilizados a fin de utilizar suficiente ganancia en los amplificadores a fin de cumplir con las condiciones de nivel indicadas anteriormente. Se debe tener en cuenta que el nivel mínimo de señal de entrada para obtener 3 dB de limitación en circuitos integrados modernos es del orden de 2 a $5\mu\text{V}$, esto significa que para obtener un nivel mínimo de entrada del orden de $.2\mu\text{V}$ se requiere poca ganancia adicional, la que se puede obtener con facilidad del amplificador de RF, mezclador y el posible amplificador que sigue al primer filtro de FI.

Características Del Detector De FM: Básicamente un detector de FM es un circuito cuyo voltaje de salida es proporcional a la diferencia entre una frecuencia de referencia (FI) y la frecuencia de la señal de entrada. Normalmente, el detector se ajusta de tal manera que el voltaje de salida tenga la misma magnitud, aunque polaridad opuesta, para frecuencias de entrada igualmente espaciadas arriba y abajo de la referencia. La característica de transferencia de un detector de FM ideal se muestra en la figura.

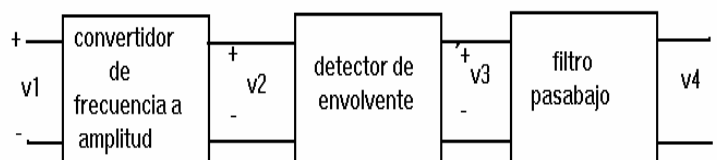


Característica de un detector ideal de FM.

Fig. N° 9 - 32

La característica de un detector real tiene una frecuencia finita de voltaje, y no es perfectamente lineal.

Básicamente algunos detectores de FM incluyen transformadores sintonizados como convertidores de frecuencia-amplitud, con esto se logra transformar una variación de frecuencia en una variación de amplitud, con esta señal se excita a un detector de AM (de envolvente) convencional seguido por un filtro pasa bajos. Existen otros tipos de demoduladores de FM que se describen mas adelante. No obstante todos estos detectores tienen la misma clase de función de transferencia, presentando un análisis similar y características comunes a todos ellos, un diagrama en bloques sería el siguiente:



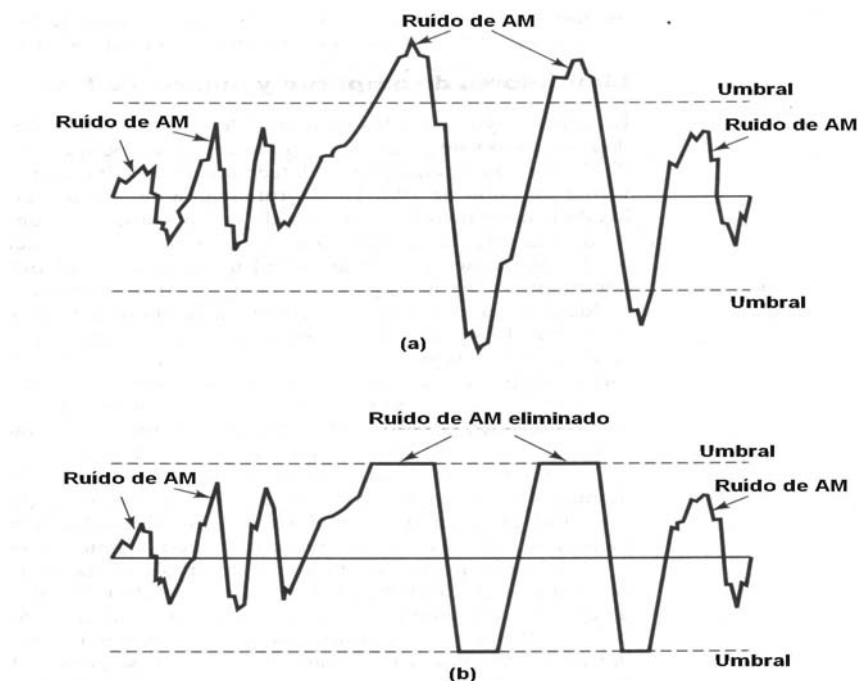
Representación de un detector de FM.

Fig. N° 9 - 33

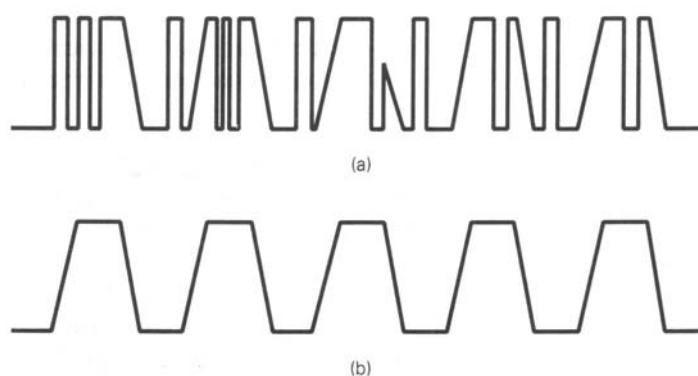
Respuesta a Interferencia y Ruido: La mayoría de los discriminadores de FM utilizan demodulación de envolvente para poder recuperar la información, desafortunadamente estos detectores no solo demodulan variaciones de frecuencia si no que también demodulan variaciones de amplitud. Tanto el ruido generado en la transmisión como las señales de interferencias se agregan a la señal útil produciendo variaciones de amplitud no deseadas, se debe incluir como ruido a la modulación en amplitud residual que generalmente acompaña a la modulación en frecuencia. El receptor demodulará las señales de interferencia conjuntamente con la señal deseada, lo que provoca una distorsión de la información recuperada.

El circuito limitador pre-detección produce en su salida una señal de amplitud constante para todas las señales de entrada cuyo nivel este por encima de un nivel mínimo preestablecido, frecuentemente llamado nivel de Umbral o Captura, esto contribuye a mejorar la relación señal – ruido (**SNR**) en la salida del demodulador en hasta 20 dB respecto de la SNR en la señal de entrada al detector.

Para señales de FI cuyo nivel se encuentra por debajo del umbral el ruido de AM no se reduce, pero para señales de FI cuyo nivel está por encima de este umbral, el limitador removerá las variaciones de amplitud de la señal de FI, obteniéndose una disminución importante del ruido de AM. En la figura siguiente se ve la acción de un limitador en la señal de entrada cuando esta está por encima del nivel de umbral:

**Fig. N° 9 – 34**

En esta gráfica se ve que cuando el nivel está por debajo del umbral, el ruido de AM no resulta eliminado, pero si se está por encima del umbral desaparece la variación de amplitud. Cuando el ruido es mayor que la señal de entrada y su nivel está por encima del nivel umbral, se obtiene una limitación en la amplitud pero de la señal de ruido, es este caso se dice que el ruido a capturado al limitador, la forma de onda de salida se ve a continuación:

**Fig. N° 9 - 35**

El ancho irregular de los pulsos se debe a los impulsos aleatorios de ruido que saturan al limitador. Cuando el nivel de la señal útil es mayor que el nivel de ruido y también mayor que el nivel umbral, los picos de esta señal saturan al limitador por lo que el ruido mas débil resulta eliminado (la señal a capturado al limitador), a esta mejora en la SNR se lo suele denominar Umbral de FM o efecto de Captura de FM. La mejora en la SNR en la salida comienza para SNR de entrada mayores de 10 dB, esto es una condición. El valor del índice de modulación m deberá ser ≥ 1 , esto se debe a que la amplitud del voltaje de salida crece con m , mejorando de esta forma la SNR, como el voltaje de salida de un detector de FM es proporcional a m^2 al

Se duplica m la SNR mejora en un factor de 4 (6dB). Si se grafica la SNR en la salida en función de la SNR en la entrada para distintos valores de m se obtiene:

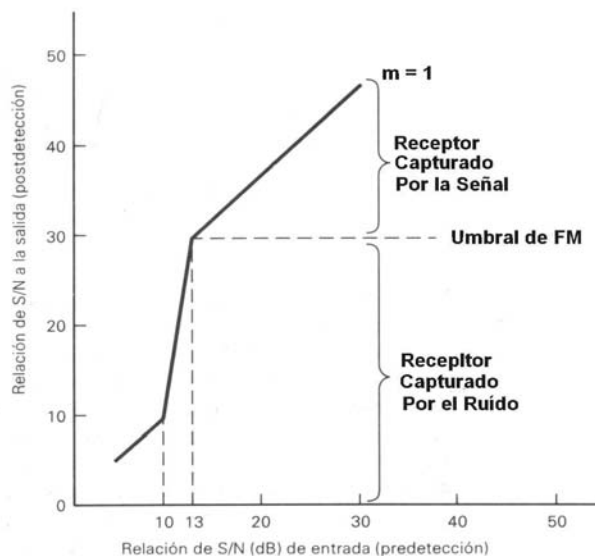


Fig. N° 9 - 36

Se considera como umbral de FM a aquel para el cual la SNR de salida es de por lo menos 30 dB, esto significa que el ruido que acompaña a la señal es pequeño comparado con el nivel de la señal. Para un $m = 1$ se puede observar que el umbral se alcanza para una SNR de entrada de 13 dB, obteniéndose una mejora en la SNR de 17 dB, esta es la mejora total que se puede obtener en este caso. Un circuito limitador que utiliza un transistor se ve en la siguiente figura:

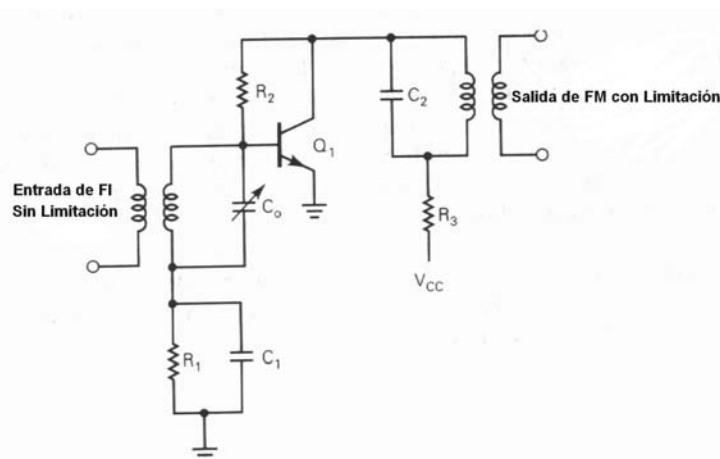
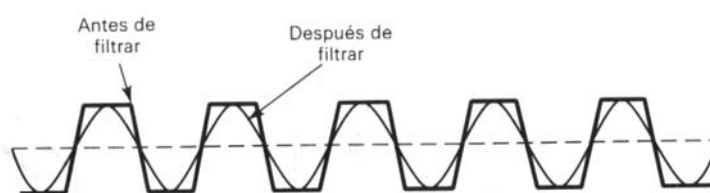


Fig. N° 9 – 37

Este se compone de un amplificador y un filtro pasabanda de salida, este último elimina los armónicos generados en la limitación, para que la limitación ocurra el nivel de entrada debe ser capaz de llevar al transistor a corte y saturación, el circuito resonante de salida se sintoniza a la frecuencia de FI eliminando la distorsión armónica e intermodulación generada por la limitación severa, esto se puede ver en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 9 – 38**

También se obtiene una mejora en la **SNR** en la salida debido a que el ancho de banda de la señal de FI en la entrada al detector es mayor que el ancho de banda de la señal de audio en la salida del detector, de esta forma toda la potencia de señal comprendida en el canal de FI contribuye a la potencia de señal de salida, pero solo la potencia de ruido que queda dentro de la frecuencia moduladora más alta positiva o negativa de la portadora, contribuye a la potencia de ruido de salida.

La mejoría en la SNR con señal de entrada por arriba del umbral, es la responsable del fenómeno llamado **Captura**. Debido a esto el detector permite que sólo la señal más intensa de dos o más señales que puedan estar presente se escuche en la salida del receptor, considerándose a las otras como interferencias. Si la relación de señal deseada a indeseada es suficientemente alta en la entrada del receptor, se hará tan alta a la salida del detector la señal deseada, que la señal no deseada desaparecerá efectivamente, no siendo escuchada. Este comportamiento contrasta con el de los sistemas de AM, en los que una interferencia molesta se puede presentar aún con una razón grande de señales deseadas a no deseadas.

La captura se mide por la cantidad denominada *razón de captura*. Para fines prácticos, es esencialmente la razón en dB, de la señal deseada a la indeseada que originará una supresión de 30 dB de la segunda.

La captura es la responsable también del efecto llamado *aquietamiento*, debido a este la salida de ruido audible a la salida del demodulador, decrece bruscamente o desaparece casi por completo con la aparición de una señal de entrada de nivel lo suficientemente alto. Esto se debe a que el gran incremento en la SNR posterior a la detección, que tiene lugar sobre el umbral, hace que la señal de salida sea más intensa que el ruido, de tal suerte que no deja escucharlo. El *aquietamiento* se puede interpretar efectuando el siguiente análisis: en ausencia de señal de entrada ingresa ruido al detector, este se puede representar mediante un fasor lógicamente con amplitud y fase aleatorias, este es demodulado produciendo a la salida un ruido de gran intensidad. Cuando aparece señal útil, el fasor de entrada al detector se compondrá por la suma de la señal mas el ruido, de esta forma cuanto mayor sea la amplitud de la señal respecto del ruido, los cambios en la amplitud y fase de la señal compuesta (suma) serán tanto menores que los que corresponden al ruido solo, mejorando considerablemente la **SNR** de salida.

La sensibilidad de aquietamiento de un receptor de FM se define como la amplitud de portadora no modulada, medida en microvoltios eficaces, que produce una reducción especificada en la salida de ruido sobre la salida de ruido presente bajo condiciones de ausencia de señal. Una especificación de sensibilidad de aquietamiento para un receptor de FM de banda estrecha, sería del orden de 0.5 μv para un aquietamiento de 20 dB; un receptor de banda normal de radiodifusión puede requerir 1.7 μv para un aquietamiento de 30 dB.

Detectores de FM: Los demoduladores de FM están constituidos por circuitos que entregan en su salida, una tensión cuya amplitud es proporcional al corrimiento de frecuencia de la señal de

entrada ($V_{sal} = \Delta f K$) donde K es la función de transferencia del demodulador y Δf es la diferencia entre la frecuencia central del demodulador y la frecuencia de entrada.

Existen varios tipos de circuitos que demodulan señales de FM, los mas utilizados son por ejemplo:

- Detector de Pendiente
- Discriminador de Foster-Seeley
- Detector de Cuadratura
- Demodulador con PLL

Detector de Pendiente: Este es el detector de frecuencia mas simple y económico que se puede construir, no obstante es poco utilizado debido a la respuesta poco lineal que presenta, un circuito básico y su respuesta se puede ver en siguiente figura:

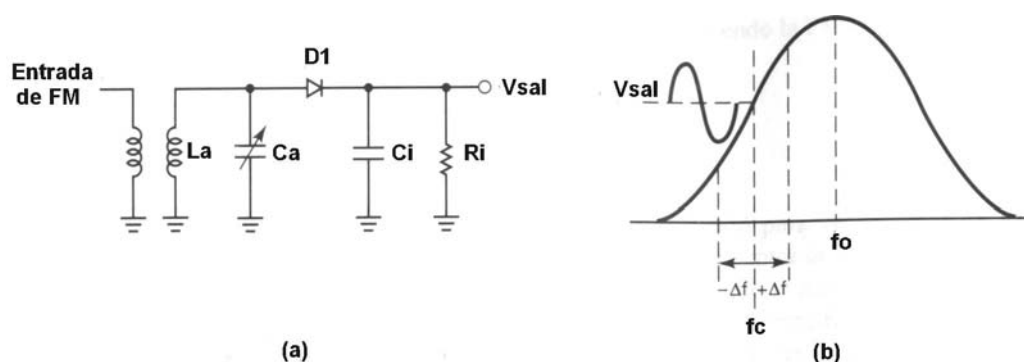
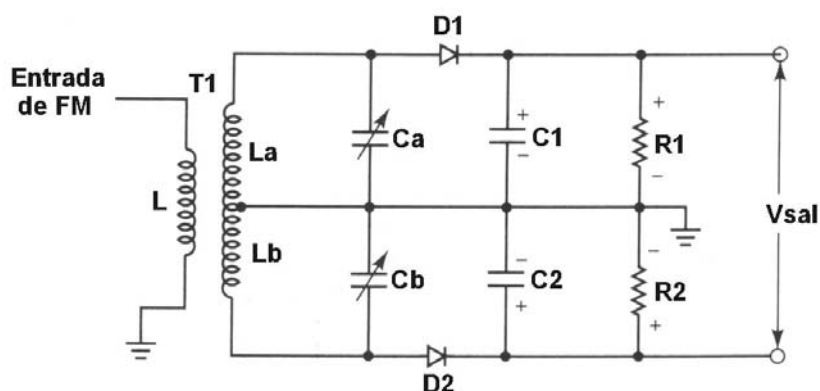


Fig. N° 9 - 39

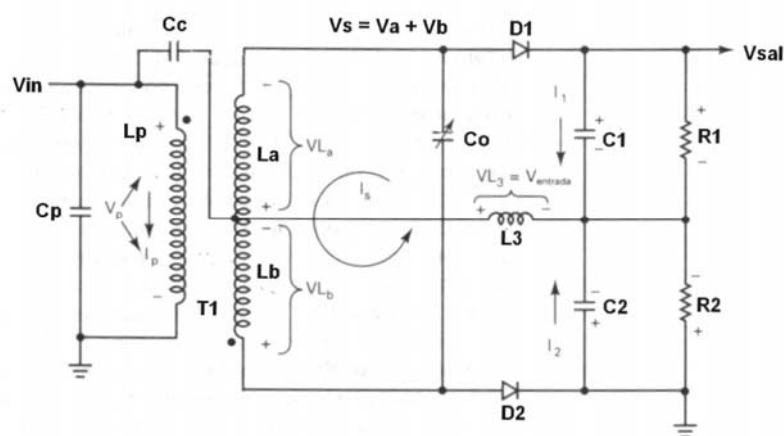
El circuito sintonizado entrega un voltaje de salida cuya amplitud es proporcional a la frecuencia de entrada, el máximo voltaje se obtiene en la frecuencia de resonancia del circuito sintonizado y decrece al alejarse la frecuencia de la señal de entrada de la resonancia. El sintonizado se ajusta para que la frecuencia de entrada de FI sin modular se ubique en el centro de la zona mas lineal de la respuesta del sintonizado, esto se puede ver en la gráfica anterior, de esta forma al desplazarse la frecuencia de entrada por encima de este punto la tensión crece y cuando se desplaza por debajo disminuye. De esta forma se convierten variaciones de frecuencia en variaciones de amplitud, el diodo $D1$ y el filtro $R1C1$ convierten esta variación en amplitud a un voltaje de salida proporcional a la variación de la frecuencia de entrada.

Una mejora a este la constituye el Detector de Pendiente Balanceado, este se compone de dos detectores de pendiente similares al anterior conectados en paralelo y 180° fuera de fase uno de otro, el funcionamiento de cada rama es similar al anterior, esto se ve puede ver en la siguiente figura:

**Fig. N° 9 – 40**

En este el circuito sintonizado superior se sintoniza por encima de la frecuencia de FI (133% de Δf) y el circuito sintonizado inferior se sintoniza la misma cantidad pero por debajo de FI, de esta forma la FI queda centrada entre las dos frecuencias de resonancias, por lo que sin modulación los voltajes de salida de los dos circuitos son iguales y opuestos, de esta forma la tensión de salida será 0. Cuando la modulación desvía la FI hacia arriba, el circuito superior sintonizado producirá un voltaje de salida mayor que el circuito inferior por lo que la tensión de salida se hace positiva, de igual forma se hará el voltaje de salida negativo cuando la FI se desvíe hacia abajo. Si bien estos detectores son muy sencillos presentan algunas desventajas como linealidad pobre, responden a variaciones de amplitud, ajuste crítico.

Discriminador de FOSTER-SEELEY: Este demodulador de frecuencia (discriminador) es muy utilizado en la recepción de señales moduladas en frecuencia o fase, básicamente transforma las variaciones de fase o frecuencia de la señal de entrada en variaciones de amplitud, estas son luego demoduladas por un detector diodico, su funcionamiento es similar al detector de pendiente balanceado, el esquema de este se puede ver en la figura siguiente:

**Fig. N° 9 – 41**

El capacitor C_c , C_1 y C_2 representan un corto circuito a la frecuencia de FI, de esta forma la señal de entrada de FI queda aplicada al choque L_3 quedando conectada directamente (en fase) entre tierra y el punto medio del bobinado secundario. Por otro lado la señal de FI aplicada al primario de T_1 induce en el secundario una tensión 180° fuera de fase con la tensión del primario, la que se divide entre L_a y L_b .

El secundario de T_1 se sintoniza a la frecuencia de FI, en resonancia la corriente del secundario I_s se encuentra en fase con la tensión secundaria V_s , además como el primario se encuentra débilmente acoplado al secundario, el bobinado primario se comporta como un inductor por lo que la corriente primaria I_p estará 90° fuera de fase con la tensión de entrada V_p y como la inducción magnética depende de la corriente primaria, el voltaje inducido en el secundario se encontrará 90° fuera de fase con la tensión de entrada (V_{L3}). De esta forma las tensiones V_{La} y V_{Lb} se encontrarán 180° fuera de fase una de otra y 90° respecto de la V_{L3} .

Por lo antes descripto la tensión aplicada al diodo D_1 es la suma vectorial de la tensión V_{La} y V_{L3} y de igual modo la tensión aplicada al diodo D_2 es la suma vectorial de V_{Lb} y V_{L3} , esto se puede ver en la siguiente gráfica:

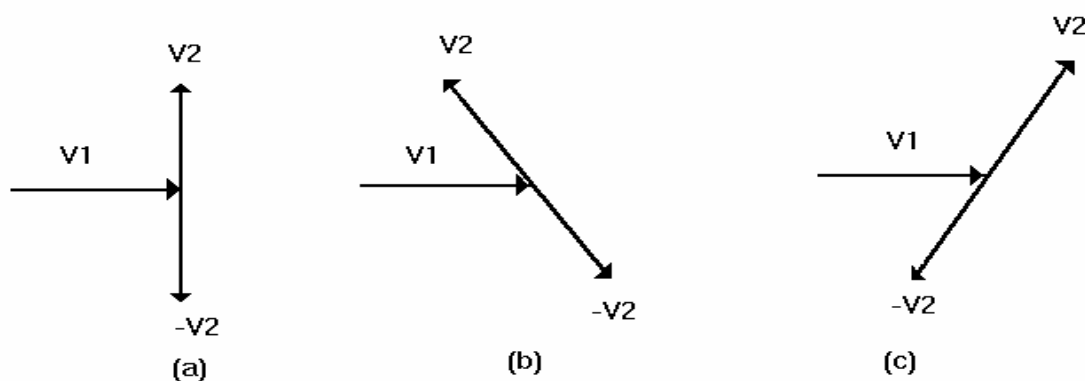
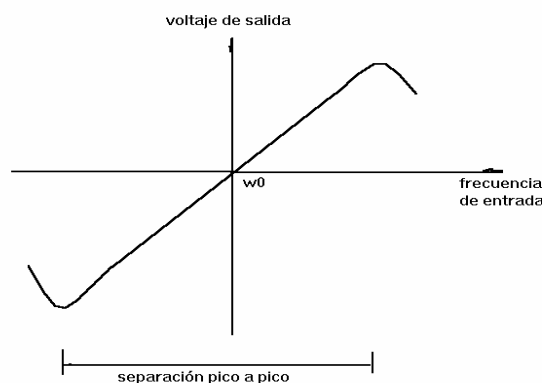


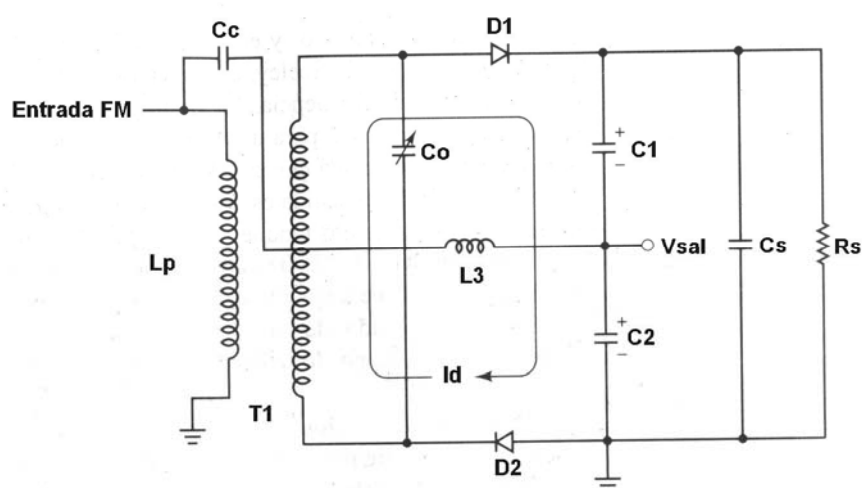
Fig. N° 9 – 42

En resonancia los voltajes aplicados a D_1 y D_2 resultan ser iguales, por lo que las corrientes I_1 e I_2 serán también iguales, cargándose los capacitores C_1 y C_2 con tensiones iguales y de polaridad opuesta, la tensión de salida será entonces $V_{sal} = V_{C1} + V_{C2} = 0$. Cuando la señal de FI se desvía en frecuencia por encima de la resonancia, la impedancia del circuito secundario se vuelve inductiva ($X_L > X_C$) atrasando la corriente a la tensión del secundario un ángulo θ el es proporcional a la desviación en frecuencia de la señal de FI de entrada. Analizando el diagrama fasorial se ve que el capacitor C_1 se cargará mientras el capacitor C_2 se descarga por lo que la tensión de salida crece positivamente, esto se ve en **c** de la figura anterior. De igual forma cuando la FI baja de resonancia, será $X_L < X_C$ siendo entonces el potencial aplicado a D_2 mayor que el aplicado a D_1 por lo que la tensión de salida se hace negativa, esto se ve en **b** de la figura anterior. La curva de respuesta de tensión de salida en función de la frecuencia se ve a continuación:

**Fig. N° 9 – 43**

Para mantener la distorsión baja la desviación en frecuencia se debe mantener dentro del sector lineal de la curva. Un problema de los discriminadores de FS es que estos responden a la desviación en frecuencia y también a variaciones de amplitud, por esto es importante el uso de limitadores previo al discriminador. El ajuste de este tipo de discriminadores se realiza inyectando en la entrada de FI una señal cuya frecuencia coincide con la central de FI y ajustando el circuito sintonizado para obtener una tensión de salida = 0.

Discriminador de Razón: El detector de razón ofrece un mejor rechazo a las variaciones de amplitud que puede presentar la señal de entrada que los discriminadores anteriores, operando satisfactoriamente con menor limitación en las etapas precedentes. Por muchos años, los detectores de razón se usaron normalmente en casi todos los receptores de FM, y muchos fabricantes consideran todavía que ofrecen una respuesta superior en audio, un diagrama de un detector de este tipo se ve en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 9 - 44**

La operación del detector de razón es muy similar al discriminador de Foster-Seeley, en este caso el diodo D2 ha invertido su polaridad, de esta forma la corriente en el secundario I_d circula por la resistencia R_s como se ve en la figura anterior, este proceso permite que el capacitor C_s se cargue a aproximadamente el valor pico de la tensión secundaria, presentando

una baja reactancia en el circuito, esto proporciona una constante de tiempo $R_s C_s$ grande que provocará que los cambios rápidos en la amplitud de la señal de entrada provocados por el ruido sean cortocircuitados a tierra. El potencial en los capacitores C_1 y C_2 se cargará y descargará en forma proporcional a los cambios en la frecuencia de la señal de entrada, siendo relativamente inmunes a las variaciones de amplitud de la señal de entrada.

El voltaje de salida se toma de la unión de C_1 y C_2 y tierra, en resonancia este voltaje se distribuye igualmente entre los dos capacitores, por lo que se obtendrá una tensión de salida positiva aproximadamente igual al 50% de la tensión pico. Cuando la frecuencia se desvía por encima y por debajo de resonancia, la tensión de carga de C_1 y C_2 se distribuye de forma tal que la tensión de salida variará entre 0 y el valor de carga de C_s de acuerdo con la modulación. La curva de respuesta de tensión en función de la frecuencia se puede ver en la siguiente gráfica:

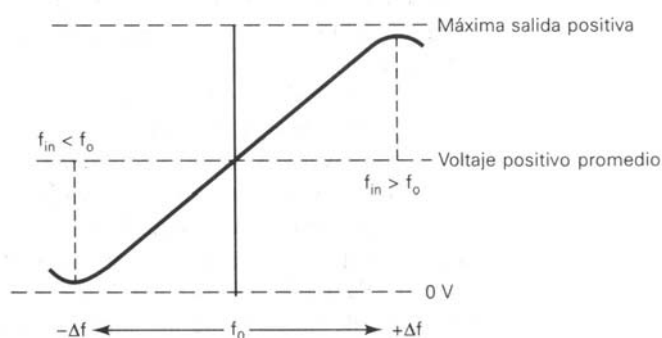


Fig. N° 9 – 45

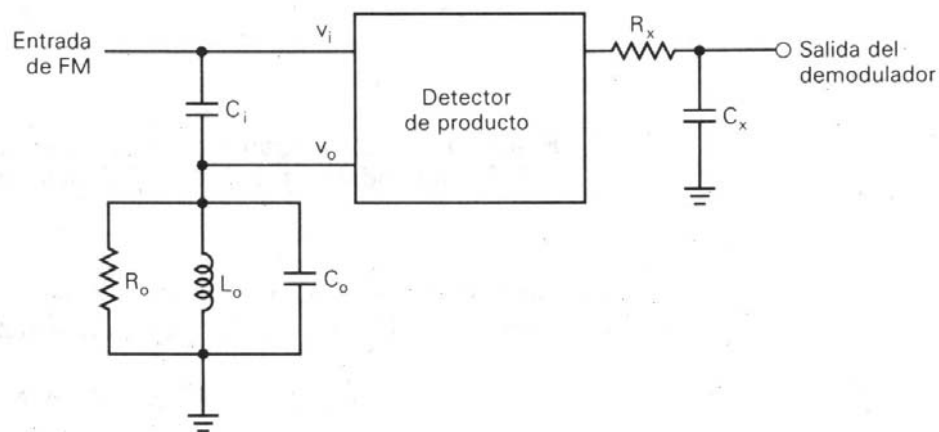
Con los mismos parámetros de circuito, los detectores de relación resultan ser unos 6 dB menos sensible que el discriminador de F.S., no obstante las dificultades para obtener componentes óptimas (particularmente transformadores) para estos circuitos, tienden a reducir esta diferencia, en la práctica, la sensibilidad de los circuitos es aproximadamente la misma.

Cuando el detector de relación se encuentra en operación de estado estacionario, los diodos conducen durante pequeña porción de cada ciclo de FI para recargar a los capacitores (esto es, para reemplazar la carga suministrada por los capacitores a los resistores y a la carga). Para que conduzcan los diodos. Si el nivel de señal de entrada cae, los valores picos de la tensión de entrada a los diodos caen también y el periodo de conducción del diodo se acorta. Esto reduce la disipación del circuito secundario y se eleva su Q , este aumento del Q provoca un incremento en el voltaje de salida del detector de razón compensando el descenso en la salida originado por el decremento de la amplitud de FI con que se inició la exposición. De igual forma, un aumento en el nivel de señal de entrada tendería a elevar el voltaje de salida, causando al mismo tiempo un decremento del Q y de la tensión en la salida del detector.

Los efectos compensados de la amplitud de señal y del Q del circuito sobre el voltaje de salida hacen que al discriminador de relación relativamente insensible a variaciones de amplitud, cuyo periodo sea corto en comparación a la constante de tiempo el discriminador RC.

Detector de Cuadratura: Un detector de cuadratura es un circuito que permite extraer la información de la señal de FI, para esto se divide la señal de FI en dos partes, una se aplica directamente a un multiplicador y la otra se hace pasar a través de una red que produce un corrimiento de fase de 90° para luego ser aplicada al multiplicador, esto se puede ver en el siguiente circuito:

Fig. N° 9 - 46



El circuito resonante se ajusta a la frecuencia central de FI y en resonancia se comporta como una resistencia, el capacitor C_1 de alta reactancia conjuntamente con la resistencia que presenta el circuito tanque produce un desplazamiento de fase de 90° a la señal de FI. Cuando se modula a la señal de FI este circuito tanque se sale de sintonía por lo que producirá un desfase adicional (θ) el que resulta ser proporcional a la desviación en frecuencia. La señal de FI es multiplicada con la señal en cuadratura en el multiplicador, produciendo en la salida un voltaje que es proporcional a la diferencia de fase entre las dos señales de entrada, matemáticamente esto se puede expresar:

$$V_{sal} = V_i V_o = [V_i \sin(\omega_i t + \theta)] [V_o \cos(\omega_o t)]$$

$$V_{sal} = \frac{V_i V_o}{2} [\sin(2\omega_i t + \theta) + \sin\theta]$$

El primer termino es un armónico de las señal de FI, el que será eliminado por el filtro pasa bajo que sigue al detector, por lo que la señal de salida será:

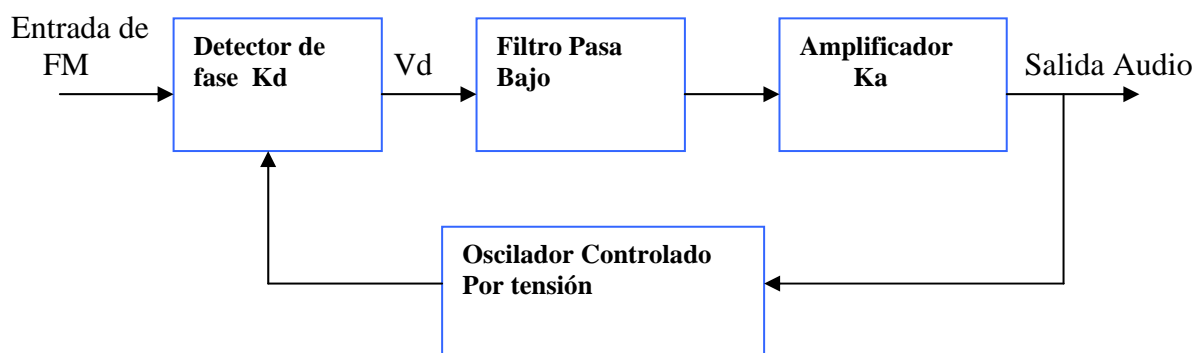
$$V_{sal} = \frac{V_i V_o}{2} \sin\theta$$

Para pequeños desplazamientos de frecuencia, $\Delta\theta$ es suficientemente lineal con la frecuencia para el circuito indicado, obteniéndose audio con calidad aceptable.

Detectores de Circuito de Fase Fija

Como se sabe el PLL es un sistema de retroalimentación que desarrolla un voltaje de error proporcional a la diferencia de fase entre una señal de entrada y una señal producida por un oscilador controlado a voltaje (VCO). El voltaje de error se filtra y se aplica al VCO, para hacer que este opere en la frecuencia de señal. Una ventaja sobresaliente de los demoduladores de FM con PLL radica en que este es capaz de seguir ligeros corrimientos en la frecuencia de FI, de esta forma se mantiene baja la distorsión de la señal demodulada frente a cambios en la frecuencia, cosa que no ocurre con los otros demoduladores.

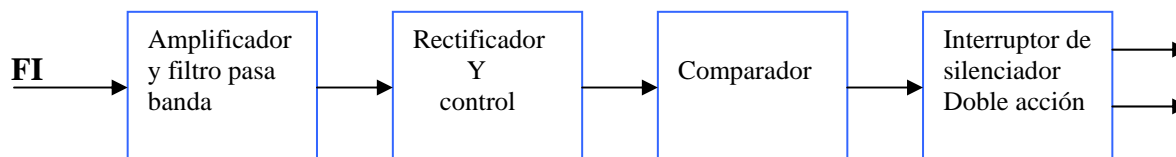
Si la frecuencia de entrada aumenta, el voltaje de error crecerá y elevará la frecuencia del VCO, lo opuesto sucederá si la frecuencia de señal decrece. El voltaje de control de VCO sigue así la modulación de frecuencia de señal de entrada y si este voltaje de control se encuentra accesible fuera del chip del PLL, se podrá utilizar a este circuito como un detector de FM. Un esquema básico de este tipo de demoduladores se puede ver en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 9 – 47**

Aunque los PLL ofrecen un umbral bajo de mejoría en la SNR y son un tema común para el análisis matemático, pocos fabricantes de receptores los han adoptado como detectores de FM. Aparentemente, los PLL disponibles comercialmente tienen un rechazo de AM relativamente pobre y una distorsión relativamente alta. Además, requieren casi el mismo número de resistores y capacitores externos como otros detectores de IC, y no tienen una ventaja inherente en sus costos.

Circuito Silenciador (SQUELCH): El circuito silenciador de audio (squelch) de uso obligatorio en receptores de alta frecuencia (VHF - UHF) tiene por función la de enmudecer la salida de audio del receptor, cuando no se encuentra presente ninguna señal de RF en el conector de antena del mismo. Este resulta ser de gran utilidad ya que evita la molestia de estar escuchando un fuerte ruido cuando no existe señal, se debe tener en cuenta que el nivel de ruido del receptor sin señal puede ser tan fuerte como la señal misma, fatigando inútilmente al operador.

Básicamente el circuito silenciador se basa en un detector de ruido, para accionar el silenciador se toma una muestra a la salida del detector de FM, en ese punto se encuentra presente el ruido cuando no existe señal o la modulación cuando existe señal, esto hace necesario que el detector de ruido deba ser capaz de diferenciar el ruido de la modulación. El diagrama en bloques de un silenciador básico es el siguiente:

**Fig. N° 9 - 48**

Existen otros sistemas de silenciamiento mas sofisticados que utilizan diversas formas de señalizaciones para activar el silenciador. Un sistema consiste en enviar con la portadora un tono de baja frecuencia, comprendido entre 60 y 250 hz. aproximadamente, este subtono queda fuera de la banda de audio (300 a 3300 Hz.) por lo que no son escuchado por los operadores. Se utilizan subtonos de distintas frecuencia, por lo que el receptor solo habilitará la salida de audio cuando reciba el subtono correspondiente, de esta forma también se mantendrá

silenciado al receptor frente a la recepción de señales cuya frecuencia coincide con la de recepción pero que utilizan distinto subtono.

Existen otros sistemas de señalización como por ejemplo doble todo o enviar una serie de números utilizando un código DTMF, en estos casos además de poder actuar sobre el silenciamiento se puede identificar al equipo que emite la señal.