

Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida (DBL - PS)

Como ya se vio, en los sistemas de modulación en amplitud, cuando se modula con un único tono, la señal de salida se compone de una portadora y un par de bandas laterales, si de alguna forma se elimina la portadora y se dejan solamente las dos bandas laterales, se obtiene un sistema de **Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida**. Para conseguir esto se utilizan circuitos especiales llamados Moduladores balanceados. Como se vio la señal de salida de un modulador de AM es la siguiente:

$$F(t) = V_c (1 + m_a \cos w_m t) \cos w_c t$$

y efectuando el producto se obtiene:

$$F(t) = V_c \cos w_c t + V_c m_a \cos w_m t \cos w_c t$$

$$F(t) = V_c \cos w_c t + (V_c m_a / 2) [\cos (w_c + w_m) t + \cos (w_c - w_m) t]$$

si el modulador suprime la portadora, la señal de salida será la siguiente:

$$F(t) = K [\cos (w_c + w_m) t + \cos (w_c - w_m) t]$$

donde los dos términos que aparecen son las bandas laterales superior e inferior, este proceso se puede obtener utilizando moduladores balanceados.

Moduladores balanceados

Este es un dispositivo que presenta dos terminales de entrada y uno de salida, por un terminal ingresa la modulación y por el otro terminal la portadora de RF, en la salida se obtiene la señal de doble banda lateral con portadora suprimida (**DBL-PS**), justamente el modulador balanceado tiene como función primordial suprimir la portadora, esto se ve en la figura siguiente:

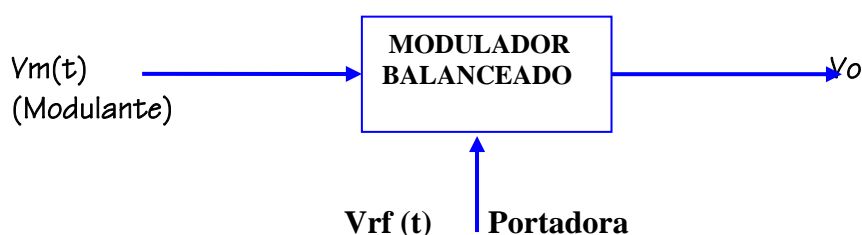


Fig. N° 6-23

Una diferencia importante respecto al sistema de AM radica en que en AM se modula en la etapa de salida, en el circuito de placa de la etapa de potencia de RF, en cambio en un sistema de DBL-PS la modulación se realiza siempre en bajo nivel, esto es con pequeña señal, esto significa que se genera la señal de DBL-PS y luego se la traslada en frecuencia y amplifica a fin de ser transmitida, esto hace que los circuitos que se utilicen a continuación, inclusive los amplificadores de potencia, tengan que ser amplificadores lineales, no pudiendo utilizarse

amplificadores clase C, en este caso, como la señal ya está modulada, es decir, ya contiene información, el amplificador clase C introduciría una distorsión importante a la modulación, por esto se utilizan amplificadores de potencia lineales clase B o clase AB, en la actualidad se utilizan amplificadores transistorizados en la configuración PUSH-PULL. La señal de salida del modulador balanceado será entonces la siguiente:

$$F(t) = +0,5 V_c m_a [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t]$$

Esta es la señal de doble banda lateral con portadora suprimida (DBL-PS), el ancho de banda de esta señal es igual que el que corresponde al de AM, esto se ve en la gráfica de la figura N° 6-24, en esta si se modula con una señal de telefonía, con una frecuencia de modulación máxima de 3 KHz y una mínima de 300 Hz, el ancho de banda será de 6 KHz y la banda de resguardo entre las dos bandas laterales es de 600 Hz, este sería el espacio de que se dispone para eliminar a una de las bandas laterales, en el caso de generar banda lateral única (BLU). Si se modula con un único tono, en el caso de AM, los versores se ubicarían como se ve en la figura 6-25a, pero para DBL-PS no se dispone de la portadora, solo están presente los dos versores girando en sentido opuesto, como se ve en la figura N° 6-25 b.

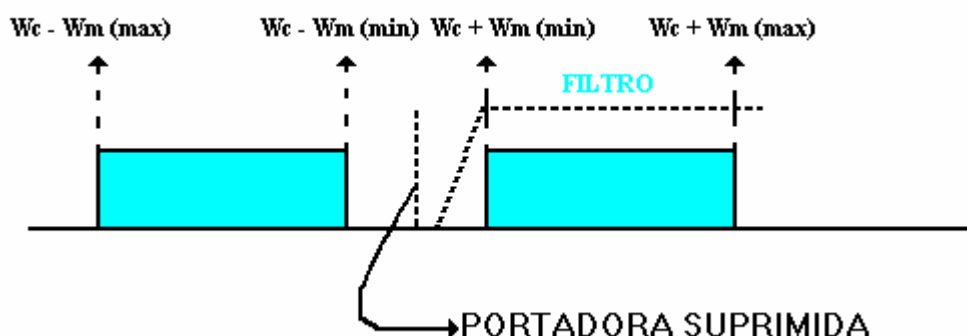


Fig. N° 6-24

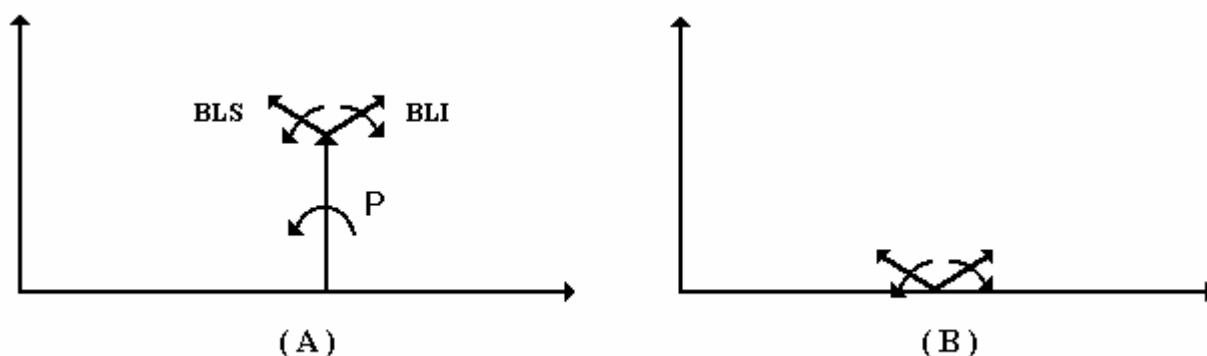


Fig. N° 6-25

La gran ventaja de este sistema de modulación radica en el hecho de que no se invierte potencia en irradiar la portadora, se debe tener en cuenta que la portadora no lleva información. El ancho de banda como ya se dijo es el mismo que para AM. Una desventaja de este sistema radica en que al faltarle la portadora no se puede recuperar la información en el receptor utilizando un simple detector de AM, para este caso el detector es mas complicado, debiendo reinyectarse la portadora en el receptor al demodular. La forma de onda de salida del modulador que se vería en un osciloscopio cuando se modula con un único tono es la siguiente:

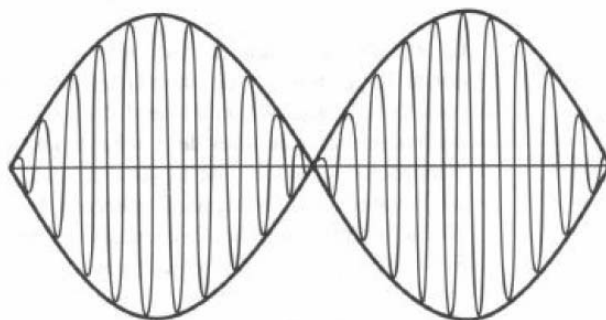


Fig. N° 6-26

Este tipo de señal es el típico que se ve siempre que se tiene presente dos tonos de distinta frecuencia, como sería el caso de una señal de DBL-PS, en este caso los dos tonos serían: $\cos(\omega_c + \omega_m)t$ y el otro $\cos(\omega_c - \omega_m)t$. Por ejemplo: Si $f_m = 1 \text{ KHz}$ y $f_c = 1 \text{ Mhz}$ en un analizador de espectros se vería:

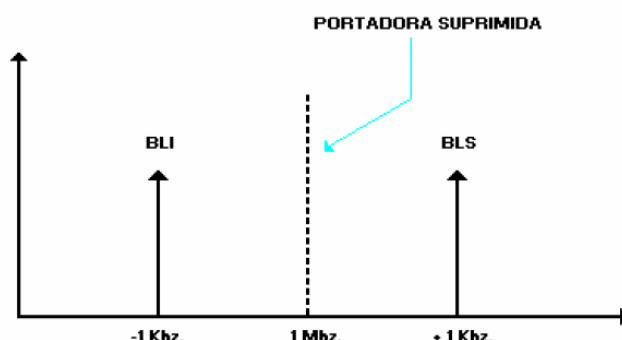
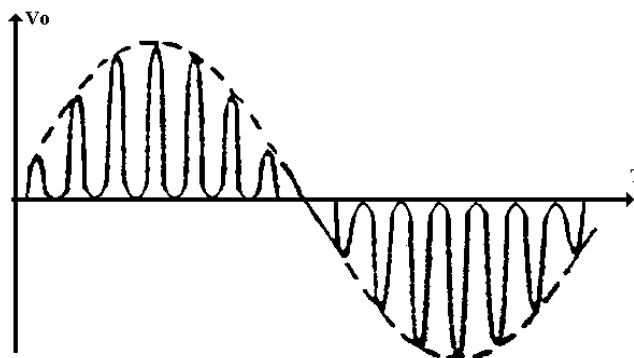


Fig. N° 6-27

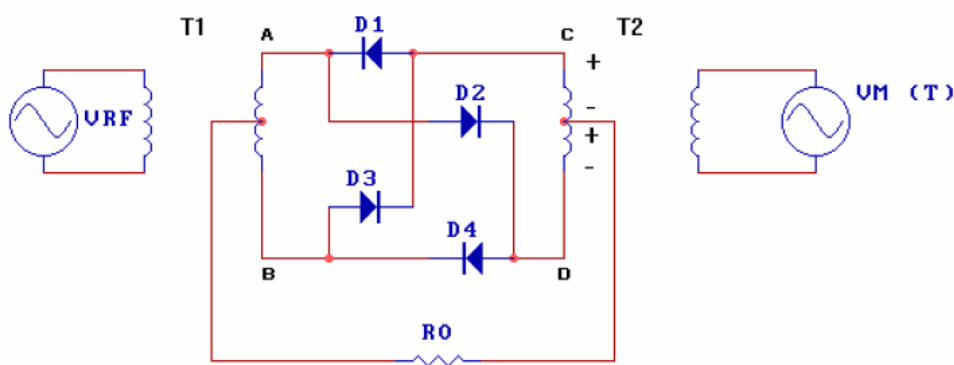
Los circuitos a utilizar como moduladores balanceados, básicamente pueden ser de dos tipos:

- A** - Moduladores de simple balance
- B** - Moduladores de doble balance

Concretamente la diferencia entre un modulador balanceado de simple balance y uno de doble balance radica en el hecho de que en el de simple balance obtengo en la salida una señal compuesta por las dos bandas laterales y una muestra de la señal modulante $V_m(t)$ con la portadora suprimida. En el modulador de doble balance la señal de salida se compone únicamente de las dos bandas laterales, estando suprimidas las dos señales de entrada, modulante y radio frecuencia. La señal de salida que se vería con un osciloscopio a la salida de un modulador de simple balance se ve en la figura siguiente:

**Fig. N° 6-28****Modulador de doble Balance con Diodos**

Los moduladores de doble balance presentan en la salida una supresión de la portadora y de la modulante, existen diversos circuitos que pueden funcionar como moduladores doblemente balanceados, uno muy utilizado es el que se ve a continuación:

**Fig. N° 6-29****Descripción:**

El circuito utiliza dos transformadores (**T1 y T2**) con punto medio y un sistema con cuatro diodos que deben presentar características idénticas. En este caso en la salida no tengo presente ninguna componente ni de RF, ni de V_m . Para que eso ocurra es imprescindible el equilibrio de todo el sistema. Es decir que los cuatro diodos sean exactamente iguales y que los transformadores tengan el punto medio justo en el centro. Este esquema es muy utilizado como modulador de doble balance o lo que es lo mismo como mezclador balanceado. Se los puede construir o se los puede adquirir ya encapsulados en forma comercial, el ancho de banda que presentan suele ser grande, por ejemplo en algunos casos van desde 0 a 500 Mhz o desde 0 a 1 Ghz. Además de utilizarse en equipos de radio, se los suele utilizar en analizadores de espectro, en las etapas de entrada.

Funcionamiento:

Para un funcionamiento adecuado, se suele hacer la amplitud de la portadora varias veces mayor que la amplitud de la señal modulante, de esta forma se logra que la portadora controle la conducción de los cuatro diodos conmutadores.

Supongamos que la señal de RF no está presente y que el nivel de la señal de modulación $V_m(t)$ es lo suficientemente grande como para llevar a la conducción de los diodos

D1 a D4, si $V_m(t)$ en un determinado momento presenta una polaridad positiva-negativa como se ve en la figura N° 6-30, esto hace al punto **C** positivo respecto del punto **D**, entonces los diodos D1 - D2 quedan polarizados en sentido directo, comportándose como un cortocircuito, los diodos D3 - D4 quedan polarizados en sentido inverso, presentando alta impedancia (circuito abierto), esto se ve en la figura siguiente:

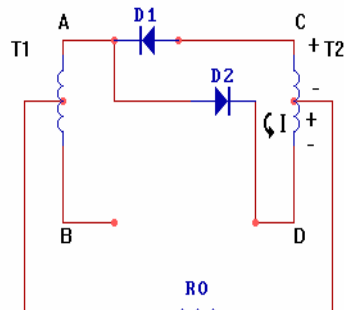


Fig. N° 6-30

Se produce la circulación de una corriente debido exclusivamente a $V_m(t)$, la que circula por los diodos D1 - D2, esta corriente circula por el secundario del transformador T2, no circulando por T1 ni por la resistencia de carga R_0 . Esto hace que en la salida no exista ninguna muestra de $V_m(t)$. Si se invierte la polaridad de $V_m(t)$, entonces conducirán los diodos D3 - D4 y no conducirán los diodos D1 - D2, al igual que en caso anterior esta corriente circulara por el secundario del transformador T2, no circulando por la carga, no apareciendo ninguna muestra de $V_m(t)$ en la carga. Esto se ve en la figura siguiente:

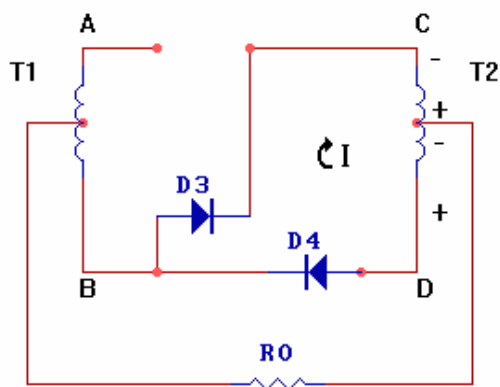
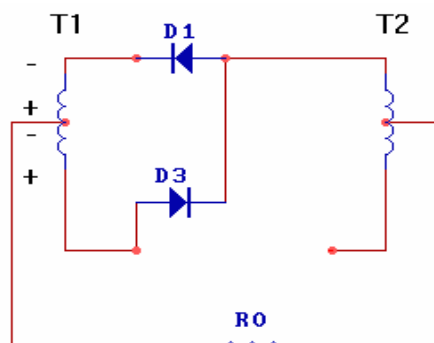
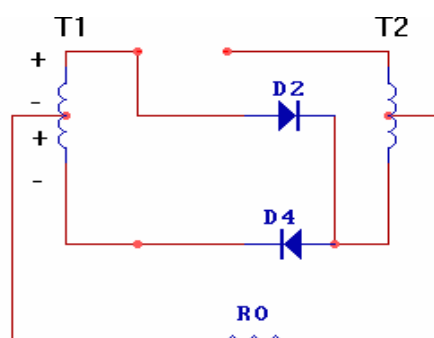


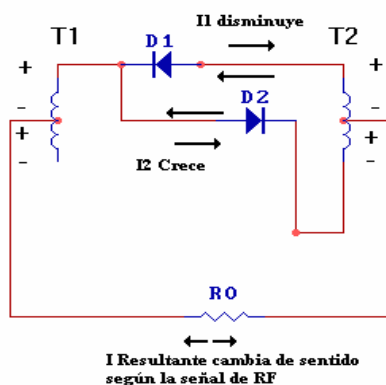
Fig. N° 6-31

Suponemos ahora que $V_m(t) = 0$ y está presente solamente la señal de RF, según la polaridad de entrada de esta, la corriente producida por la RF circulará por los diodos D1 - D3 o por los diodos D2 - D4, esto se ve en los circuitos de la figura N° 6-32 y N° 6-33 a continuación:

**Fig. N° 6-32****Fig. N° 6-33**

En ambas figuras no circula corriente de RF por la resistencia de carga R_o , por lo tanto no tengo muestras de la señal de RF en la salida. Tampoco tengo muestras de la señal de RF en el primario del transformador T2, por lo que no aparece RF en el puerto de $V_m(t)$.

Supongamos ahora que tengo presente la señal $V_m(t)$ simultáneamente con la señal de RF, con las polaridades indicadas en la siguiente figura:

**Fig. N° 6-34**

Si el nivel de la señal $V_m(t)$ es el encargado de comandar la conducción de los diodos D1 a D4, con una polaridad determinada circularan las corrientes i_1 e i_2 por los diodos D1 y D2 respectivamente, la componente de RF con la polaridad indicada provocará variaciones en las corrientes i_1 e i_2 , haciendo disminuir a la primera y crecer a la segunda en la misma proporción, el resultado es que aparece una corriente que circula por la carga, que no es ni RF ni

$V_m(t)$, sino la resultante de estas dos aplicada a los diodos, en cuyas alinealidades se generaran las componentes no presentes en las entradas (componentes suma y diferencia).

Como la señal $V_m(t)$ es la de menor frecuencia, su variación es mucho más lenta que la de la señal RF, esto significa que mientras $V_m(t)$ varia en un sentido la señal de RF invierte su polaridad una gran cantidad de veces, esto hace que la corriente en la carga también invierta el sentido de su circulación gran cantidad de veces. La forma de onda que obtendremos en la carga se ve en la gráfica siguiente:

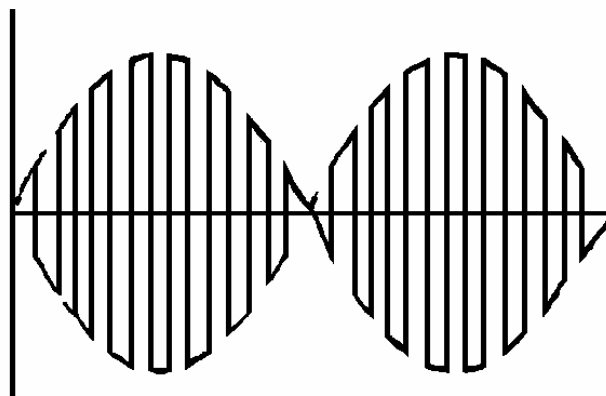
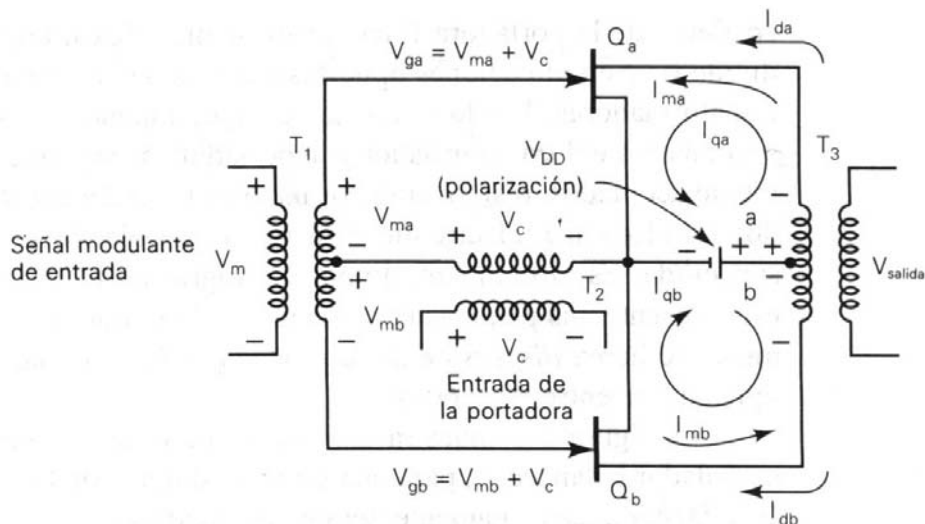


Fig. N° 6-35

Con este tipo de moduladores balanceados se pueden obtener supresiones de portadora del orden de 40 dB a 60 dB, con pérdidas de inserción del orden de 6 dB, dependiendo esto de la homogeneidad de los diodos y de la calidad de los transformadores (balance, pérdidas, etc.). Algunos fabricantes proveen moduladores balanceados de este tipo con grandes prestaciones de ancho de banda, aislación entre puertos, estabilidad de funcionamiento, tamaño, encapsulados normalizados, bajo costo, etc.

Modulador Balanceado con FET

Los transistores Fet son especialmente aptos para este uso debido a que presentan una ley de variación cuadrática, por esto generarán solo productos de segundo orden. El modulador balanceado con Fet es similar a un amplificador push-pull pero con dos terminales de entrada, por uno ingresa la portadora y por el otro ingresa la modulante, un esquema se puede ver en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 6-36****Funcionamiento:**

La portadora se aplica en forma simultanea y en fase a las compuertas de los Fet, por lo que aparecerán en la salida también en fase, las corrientes que producen los Fet en el primario del transformador T_3 están 180° fuera de fase por lo que se cancelan, no apareciendo en la salida. La señal modulante se aplica a las compuertas de los Fet en forma simultanea pero desfasada 180° una de otra, esto provocará una variación en las corrientes de ambos Fet, resultando en un incremento en la corriente de drenaje de uno de los Fet y una reducción en la corriente de drenaje del otro, este desequilibrio en la corriente que circula por cada rama del bobinado primario de T_3 , incluye además de las componentes portadora y modulante, el producto de estas dos, lo que genera las dos bandas laterales, que finalmente aparecen en la salida.

El transformador T_1 opera en audio frecuencia mientras que los transformadores T_2 y T_3 son de radiofrecuencia, por esto cualquier componente de audio que aparece en el primario del transformador T_3 no es transferido a la salida. Para obtener gran rechazo de la portadora los transistores deben estar apareados y punto medio del transformador T_3 perfectamente centrado, la atenuación de portadora que se puede obtener es del orden de 40 a 60 dB.

Modulador Balanceado con CI MC1496

Estos circuitos integrados se fabrican especialmente para funcionar como un modulador balanceado de doble balance de altas prestaciones. Básicamente se compone de una serie de amplificadores diferenciales que provocan una gran atenuación de la portadora y la modulante en la salida. Internamente los circuitos más importantes que utiliza para este fin, se ven en la siguiente gráfica:

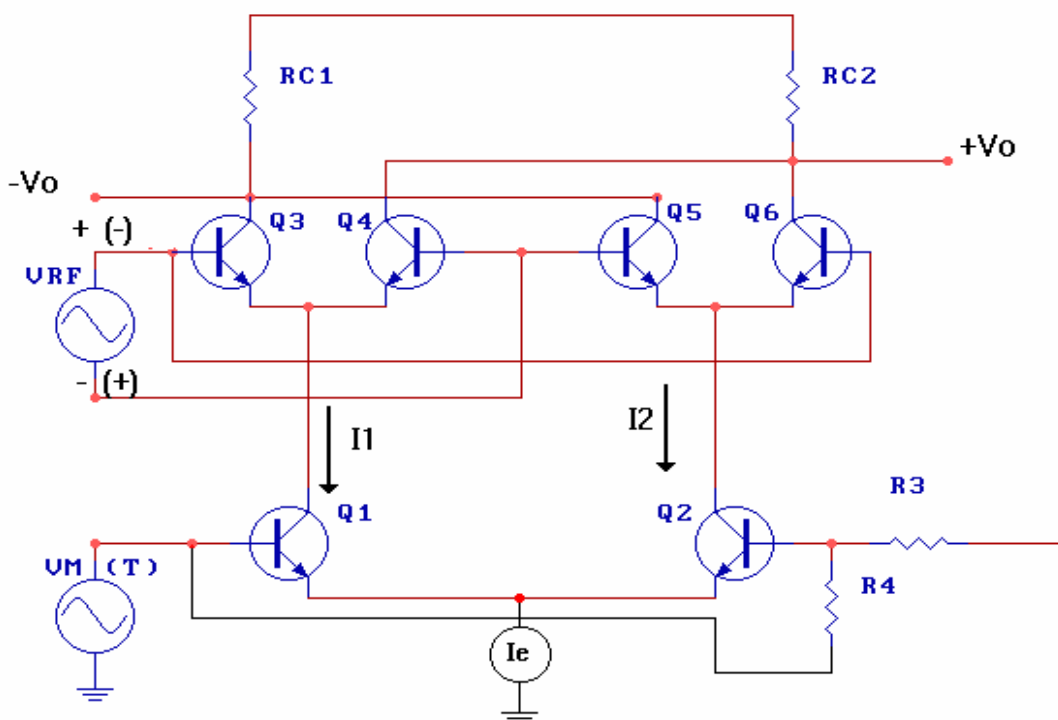


Fig. N° 6-37

Funcionamiento

Presenta dos terminales de salida en los cuales se obtiene la misma señal pero desfasada 180° una de otra. Presenta dos terminales de entrada para la señal de RF, pudiendo entrar con la señal por cualquiera de ellos, según como ingrese esta señal ingresará en fase o no. Posee además otros dos terminales por donde se ingresa con la señal de modulación $V_m(t)$, pudiendo ingresar con $V_m(t)$ por cualquiera de ellos, según que se desee introducir un desfase a esta señal o no. Se dispone de un generador de corriente constante que controla la corriente que circula por los transistores Q_1 y Q_2 , de manera que si una crece la otra decrece en la misma proporción. La tensión $V_m(t)$ debe tener un nivel lo suficientemente grande como para llevar a la conducción a los transistores Q_1 y Q_2 , el nivel de tensión de la señal de RF debe ser lo suficientemente grande para llevar a la conducción a los transistores Q_3 , Q_4 , Q_5 y Q_6 . Si la señal $V_m(t) = 0$, los transistores Q_1 y Q_2 estarán cortados, no apareciendo ninguna señal en la salida. De igual forma si la señal de RF = 0 o no tiene un nivel suficiente, los transistores Q_3 , Q_4 , Q_5 y Q_6 estarán también cortados, por lo que tampoco tengo señal de salida. La única forma de obtener una señal de salida es que estén presentes las dos señales de entrada y con nivel lo suficientemente grande.

Supongamos que $V_m(t)$ está creciendo, entonces la corriente i_1 también crece, si la señal de RF está en la polaridad positivo-negativo, entonces los transistores Q_3 y Q_6 conducirán y Q_4 y Q_5 estarán cortados. Esto significa que la corriente i_1 circulara por el transistor Q_3 y por la resistencia de carga R_{c1} , produciendo una mayor caída de tensión en R_{c1} lo que provoca una disminución de la tensión en el colector de Q_3 .

Simultáneamente la corriente i_2 decrecerá en la misma proporción que creció la corriente i_1 , esta corriente circulará por el transistor Q_6 y la resistencia de carga R_{c2} , al disminuir esta corriente disminuye la caída de tensión en la resistencia R_{c2} , provocando un aumento en la tensión de colector del transistor Q_6 , es decir que existe un desfase de 180° entre las dos tensiones de salida. Si se invierte la polaridad de la tensión de RF, se cortarían los transistores Q_6

y Q_3 , comenzando a conducir los transistores Q_4 y Q_5 , en este caso i_1 circulará por Q_4 y R_{c2} , entonces la tensión en el colector de Q_6 que estaba creciendo ahora comienza a decrecer. Análogamente la corriente i_2 deja de circular por Q_6 , circulando ahora por Q_5 y R_{c1} provocando un aumento de la tensión en el colector de Q_3 . El resultado de esto es que a la salida se obtiene una tensión que varía de acuerdo con las variaciones de la señal de RF, mientras $V_m(t)$ se modifica lentamente.

Este tipo de modulador balanceado presenta una supresión de portadora del orden de 60 dB si se lo trabaja en baja frecuencia (1 o 2 Mhz), si se lo trabaja con frecuencias del orden de 100 Mhz la supresión de portadora es del orden de 40 a 50 dB. Este CI posee además un elemento de control que me permite equilibrar los diferenciales a fin de ajustar la supresión de portadora, logrando de esta forma las atenuaciones indicadas. La forma de onda de salida se puede ver en la siguiente figura:

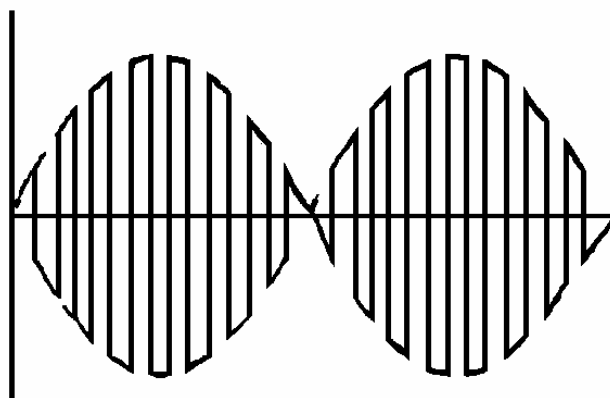


Fig. N° 6-38



Fig. N° 6-39

Multiplicador por dos

Se puede utilizar a este CI también como multiplicador de frecuencia por dos, igual que los circuitos resonantes de primer armónico, pero con la gran ventaja que es de banda ancha. Un multiplicador por dos con un circuito sintonizado debe poseer un Q relativamente alto, para eliminar las componentes indeseadas, esto significa que si se desplaza la frecuencia de entrada, se debe resintonizar el circuito sintonizado a fin de mantener la multiplicación.

En cambio en el caso de utilizar este CI, se puede efectuar la multiplicación por dos en banda ancha, debido a que no utiliza un circuito sintonizado como multiplicador, bastará con inyectar en los terminales de entrada la misma señal, a la salida se obtiene una señal cuya frecuencia resulta ser la suma de las frecuencias de las dos señales de entrada. La diferencia no aparece por ser cero, es decir se obtiene una multiplicación por dos. Si la señal de entrada varía su frecuencia, la frecuencia de la señal de salida también varía, esto es un multiplicador por dos de banda ancha.

Ejemplo: si una señal de un oscilador local varía entre 10 y 40 Mhz, utilizando este CI se puede obtener en la salida una señal que varíe entre 20 y 80 Mhz, el contenido de componentes indeseadas es bajo debido a que la operación efectuada es una suma y no una multiplicación, es decir se obtiene una salida limpia.

Modulador de Simple Balance:

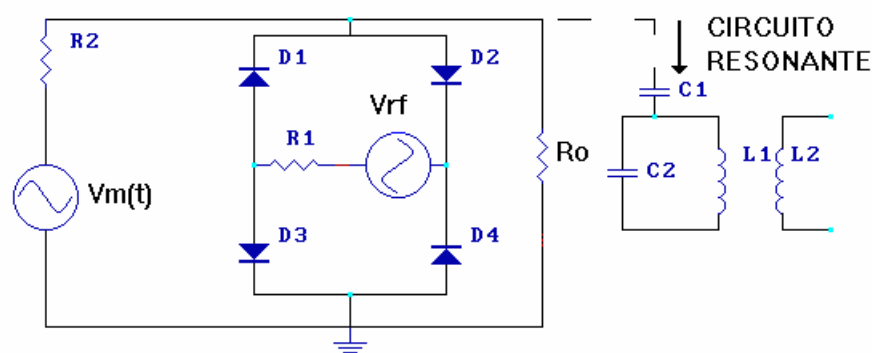
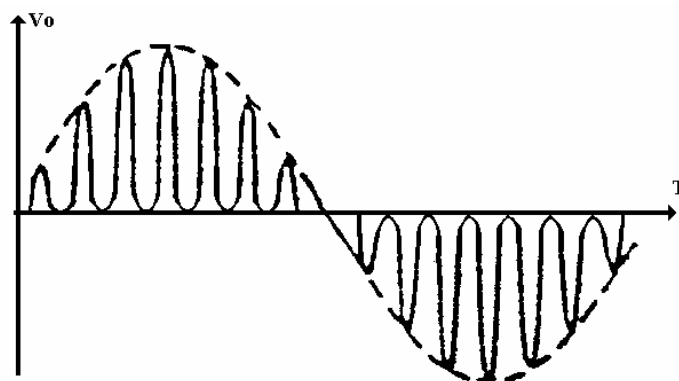
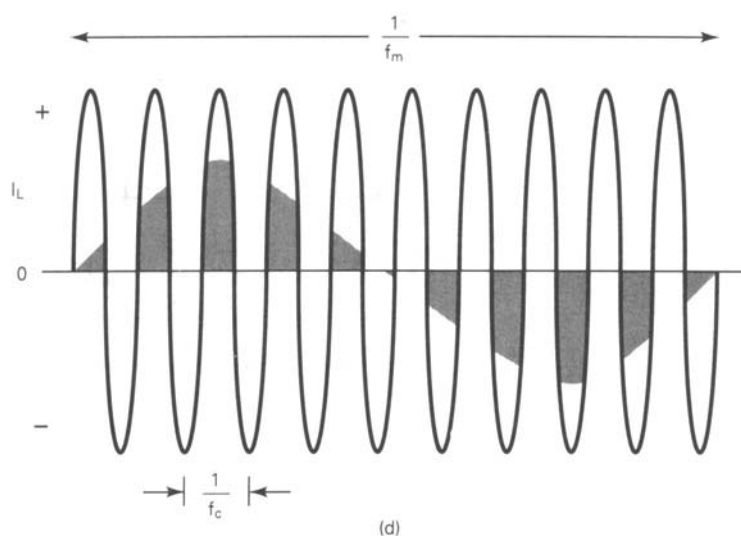


Fig. N° 6-40

La señal de RF debe tener nivel suficiente para controlar la conducción de los diodos. Si no existe señal de modulación $V_m(t)$, la señal de RF provocará que los terminales cambien de polaridad en forma alterna, esto es $(+, -)$ ó $(-, +)$. Cuando sea $(+, -)$ quedarán polarizados en sentido directo los diodos D1, D2, D3 y D4, en esta condición los diodos presentarán un cortocircuito a la señal de RF, no obteniéndose en la salida señal de RF. Cuando la polaridad se invierte $(-, +)$, los diodos se polarizan en sentido inverso, no circulando corriente por estos, no obteniéndose tampoco señal de salida de RF en la resistencia de carga R_o .

Si existe señal de modulación $V_m(t)$ y no de RF, se obtendrá en la salida una muestra de esta señal. Es importante aclarar que el nivel de $V_m(t)$ no debe ser capaz de llevar a conducción a los diodos porque se produciría un recorte de esta, distorsionándose la señal de modulación.

Al tener presente las dos señales, se debe tener en cuenta que $V_m(t)$ varía lentamente respecto de la señal de RF, de esta forma mientras $V_m(t)$ está creciendo, la señal de RF cambia de polaridad un gran número de veces, de tal forma que cuando presenta la polaridad $(-, +)$ los diodos no conducen, apareciendo en la salida (R_o) una muestra de $V_m(t)$ creciendo muy lentamente, cuando se invierte la polaridad de RF $(+, -)$, los diodos entran en conducción poniendo el terminal de salida en cortocircuito por lo que no aparece señal en la salida. Al invertirse nuevamente la señal de RF vuelve a aparecer $V_m(t)$ a la salida y así sucesivamente, obteniéndose la forma de salida indicada en la figura siguiente:

**Fig. N° 6-41**

Las corrientes que circulan por los diodos cuando la señal de RF los lleva a conducción, se desequilibra debido a la presencia de la señal $V_m(t)$, variando esta corriente de un diodo a otro y al reaccionar entre sí estas corrientes provoca la aparición de las componentes suma y diferencia, esto es las Bandas Laterales. La muestra de la señal $V_m(t)$ que aparece en la salida, espectralmente esta muy alejada de las bandas laterales, por esto es fácilmente eliminada mediante la utilización en la salida de un circuito resonante sintonizado a la frecuencia de portadora, de esta forma $V_m(t)$ es derivada a tierra por este, obteniéndose en la salida R_o únicamente las dos bandas laterales, al igual que con un modulador de doble balance.

Con este tipo de moduladores se puede obtener una supresión de portadora del orden de los 30 a 40 dB, para esto deberán ser los diodos exactamente iguales. Preferentemente se utilizan diodos integrados en una sola cápsula que garantiza su igualdad.

BANDA LATERAL ÚNICA (BLU)

Como ya se vio, en un sistema de modulación en amplitud la portadora no transporta ninguna información, además las dos bandas laterales transportan la misma información. Esto significa que se puede suprimir la portadora y una de las bandas laterales, transmitiéndose solamente una banda lateral (**BLU**). Esto nos permite obtener un importante ahorro de energía ya

que la potencia a transmitir es mucho menor y además se obtiene un mayor aprovechamiento del espectro ya que el ancho de banda es el 50% que el que corresponde a AM. La generación de una señal de BLU es un proceso relativamente complicado que requiere del uso de circuitos y componentes especiales. La recepción de estas señales también es algo mas complicado que la recepción de señales de AM, requiriendo de filtros y un demodulador especial.

Básicamente se dispone de tres métodos para generar señales de BLU: 1- Filtrado, 2- el de Faseamiento, 3- Tercer método. Cada uno de estos posee distintas características.

Método de filtrado:

En este método, se obtiene la señal de doble banda lateral (DSB-SC) utilizando un modulador balanceado, de las dos bandas laterales obtenidas se elimina una de ellas mediante el uso de un filtro pasa-banda de corte pronunciado, ver figuras N° 6-42 y 6-43. El filtro que elimina la banda lateral indeseada debe presentar una gran pendiente, esto se debe a que debe atenuar como mínimo 40 dB la banda lateral indeseada, disponiendo de una banda de resguardo de 600 Hz entre las dos bandas. La figura 6-42 muestra el espectro de la onda moduladora de banda base con un rango de frecuencia que va de f_1 a f_2 , el espectro de banda lateral doble alrededor de la portadora (suprimida) en f_c y la función de transferencia de filtro deseada.

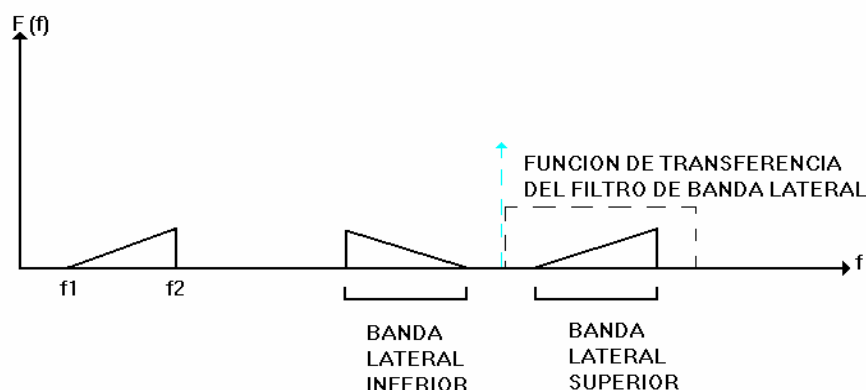
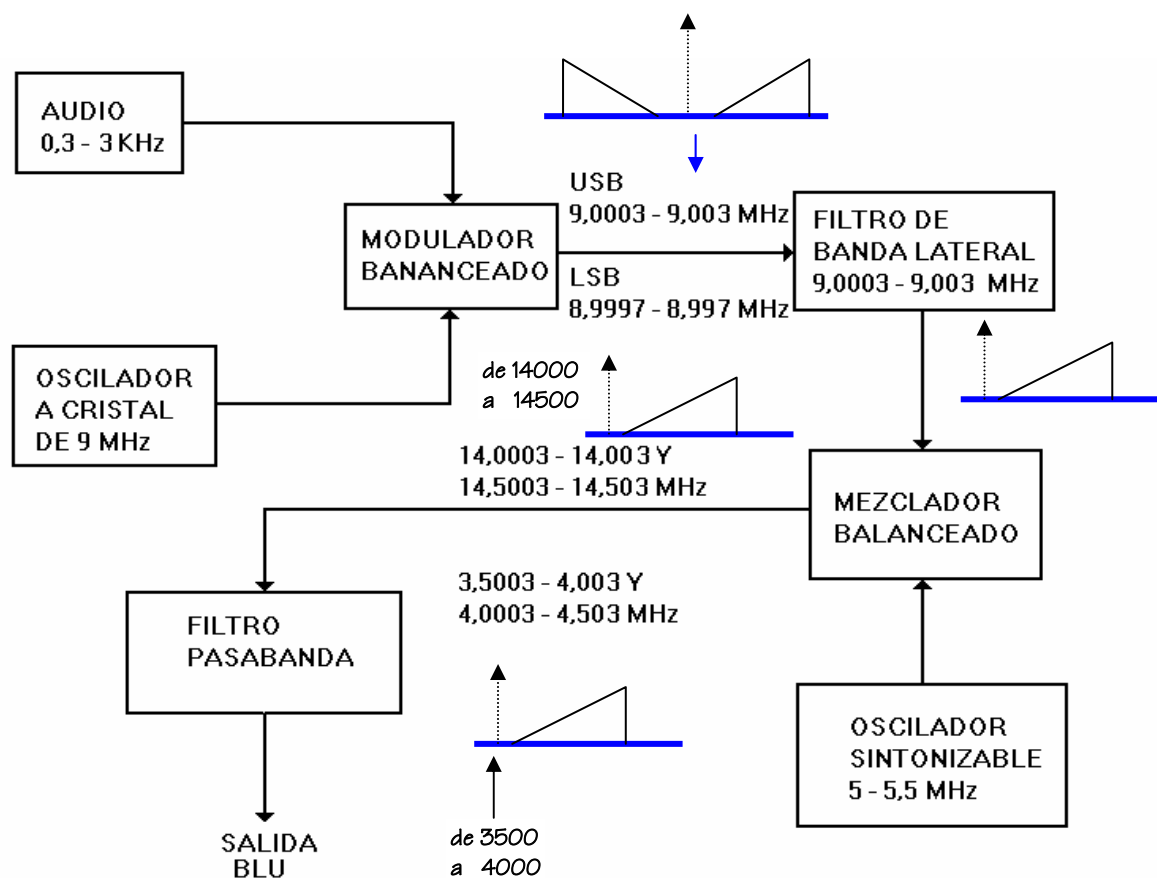


Fig. N° 6-42

Para transmisión de telefonía, la frecuencia de banda base más baja es de 300 Hz, por consiguiente, el filtro de banda lateral debe cortar en un intervalo de 600 Hz. Cuanto mayor es la frecuencia de la portadora, el intervalo de corte se hace porcentualmente menor, en consecuencia, se requiere un filtro más complicado con características de corte más aguda. En la medida que se incremente la agudeza del corte, el filtro introduce más distorsión de fase y amplitud, en la porción de la señal transmitida cerca de la región de corte. Esta distorsión aparece en la señal demodulada por el receptor, aunque generalmente no se percibe en la transmisión de voz de canal único. Se dispone de filtros de cristal multipolares con características de corte agudo, para usarse como filtros de banda lateral, estos operan en distintas frecuencias y en algunas oportunidades relativamente elevadas.

La figura 6-43 muestra un sistema de banda lateral única de frecuencia variable dentro de un cierto rango. Este utiliza un oscilador de cristal de 9 Mhz y un modulador balanceado para generar dos bandas laterales, como se ilustra. Un filtro de banda base de cristal rechaza la banda lateral inferior, mientras que la superior se inyecta a un mezclador balanceado, junto con una señal entre 5 a 5,5 Mhz, procedente de un oscilador sintonizable. De este modo, la banda base superior procedente del mezclador cubre la banda de 14 a 14.5 Mhz, la banda resultante inferior está lo suficientemente alejada, como para que un filtro pasa-banda

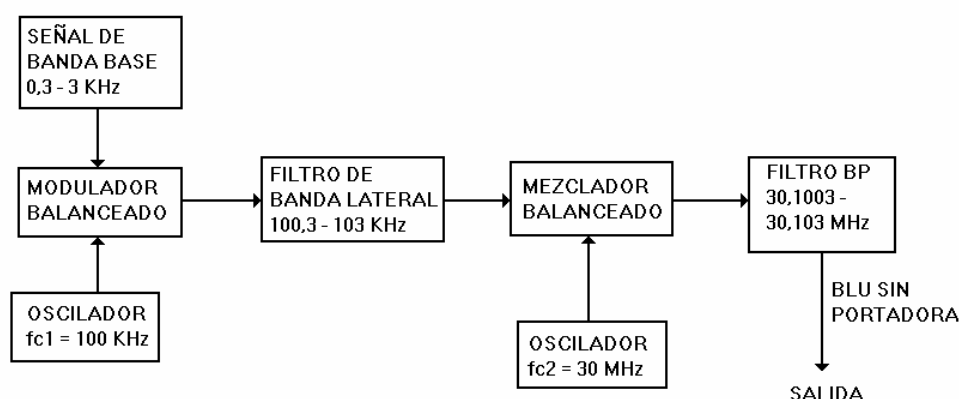
sintonizado de simple construcción sea suficiente para permitir el paso de la banda lateral deseada y rechazar la banda indeseada y los armónicos producidos por el mezclador.



(a) MODULADOR DE ALTA FRECUENCIA

Fig. N° 6-43

La figura 6-44 ilustra un sistema en el que el intervalo para el corte del filtro de banda lateral es un porcentaje mayor respecto de la frecuencia de portadora f_c , que el utilizado en el sistema anterior. En virtud del corte más gradual, el diseño del filtro es más sencillo y se introduce menos distorsión. La desventaja es que el filtro es más grande y más caro. Con las frecuencias mostradas en el diagrama, el intervalo de corte para el segundo filtro es aproximadamente de 200 KHz, que es casi el mismo porcentaje de la frecuencia portadora que se tuvo en el primer filtro de banda lateral. Aunque el rango de frecuencia de banda base mostrado es para un canal de voz único, se puede usar un sistema de este tipo para transmitir trenes de pulsos o multiplexar canales de voz.

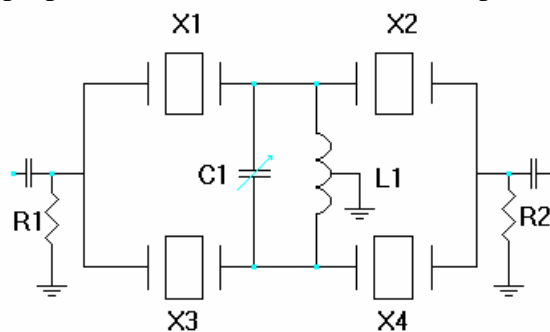


(b) MODULADOR DE BAJA FRECUENCIA

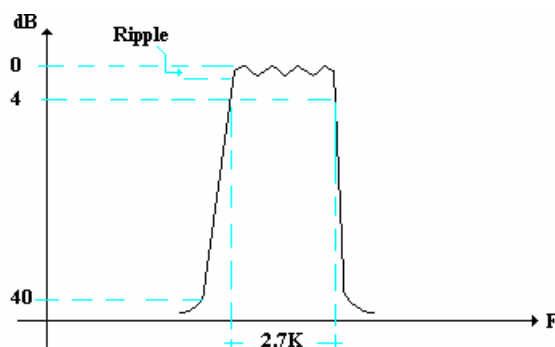
Fig. N° 6-44

Se pueden utilizar distintos tipos de filtros para eliminar la banda lateral indeseada, los primeros filtros utilizados fueron filtros mecánicos, estos trabajan en baja frecuencia, los más comunes son filtros de 250 KHz. y de 455 KHz. En la actualidad la mayoría de los filtros utilizados son a cristal, los que se los construye para trabajar a frecuencias relativamente altas (1.650 KHz. - 2.000 KHz. - 5.000 KHz. - 9.000 KHz. - etc.). Estos filtros se los construye para atenuaciones de la banda lateral indeseada que van de 40 a 60 dB.

Filtro a Cristal: Estos filtros pasa banda utilizan una red de cristales para obtener el rechazo de banda lateral indeseada necesario, existen distintas configuraciones para este filtro, un filtro típico muy utilizado que proporciona 40 dB de atenuación se puede ver en la siguiente figura:

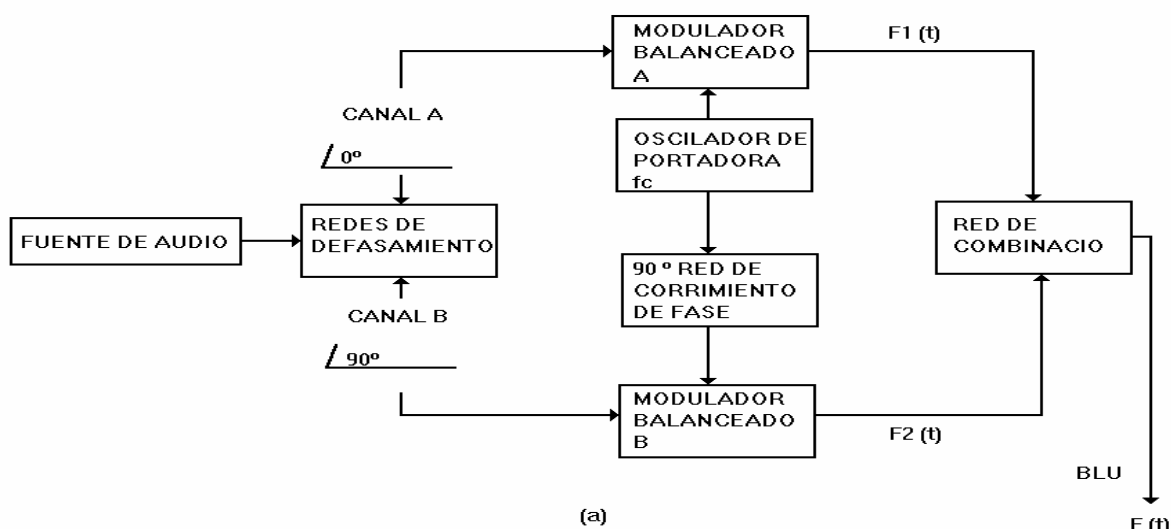
**Fig. N° 6-45**

El valor de las resistencias R1 y R2 se selecciona de forma de mantener mínimo el ripple en el centro de la banda pasante, el fabricante indica normalmente el ripple máximo que presenta el filtro y el valor de las impedancias de entrada y salida necesarias para mantener bajo el mismo. El capacitor variable C1 se ajusta para obtener una respuesta simétrica. La frecuencia de los cristales depende de la frecuencia central del filtro, normalmente X1 y X2 son de igual frecuencia al igual que X3 y X4, existiendo una diferencia X1-X2 a X3-X4 de aproximadamente 1,5 KHz. La característica de banda pasante de un filtro como el anterior se ve a continuación:

**Fig. N° 6-46****Método de Desfasaje:**

La necesidad de disponer de un filtro caro de corte pronunciado se evita con el sistema mostrado en la figura 6-48. La señal de audio se inyecta a una red de desfasaje que presenta dos terminales de salida cuyas señales son de igual amplitud, pero sus fases difieren en 90° para toda la gama de frecuencias dentro del canal audio. Se dispone de un oscilador de portadora que también presenta dos salidas de igual amplitud pero con un corrimiento de fase de 90° una de otra. Si se satisfacen exactamente los requerimientos de fase y si son idénticos los moduladores balanceados utilizados, las salidas combinadas se cancelan para una banda lateral y se suman para la otra.

La dificultad de este sistema radica en la necesidad de producción de dos señales de audio que difieran en fase 90° exactamente dentro de todo el rango de audio. Como no hay un circuito que pueda producir un corrimiento de 90° en un canal para todas las frecuencias, es menester diseñar dos redes de paso global con corrimiento de fase que difieran en 90° dentro del rango que interesa, como muestra la figura Siguiente.

**Fig. N° 6 - 47**

donde será:

$$F1(t) = K [\cos (w_c + w_m) t + \cos (w_c - w_m) t]$$

$$F2(t) = K [\cos (w_c + w_m + 180^\circ) t + \cos (w_c - w_m) t]$$

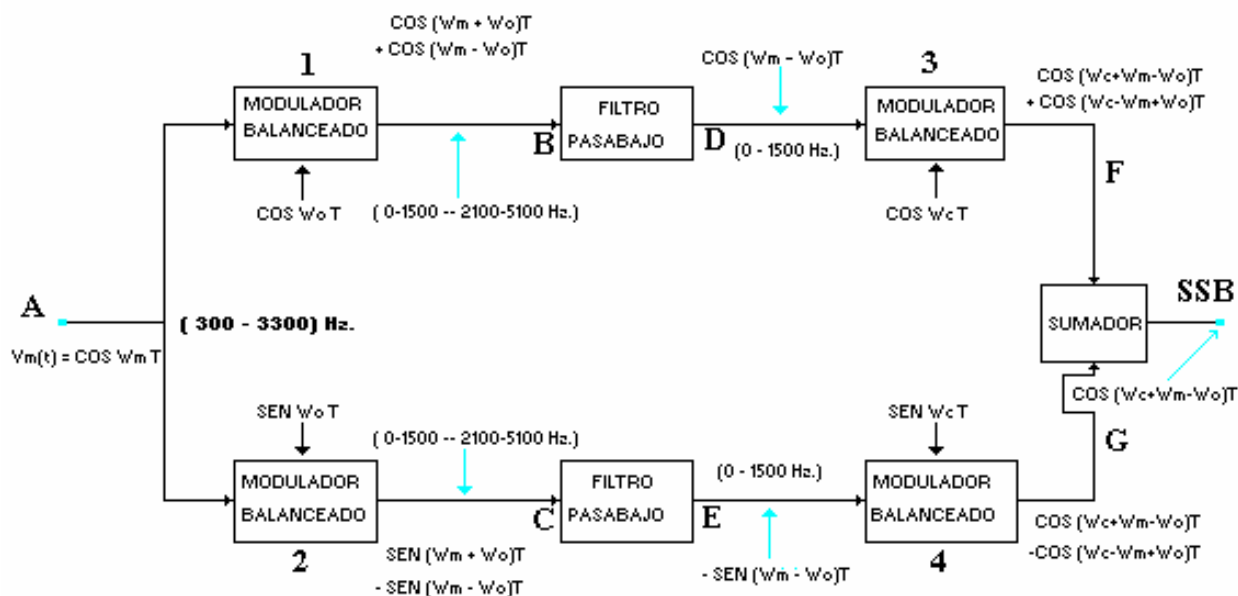
la señal de salida será:

$$\mathbf{F(t) = K \cos (w_c - w_m) t}$$

Tercer método:

Este método fue desarrollado por D. K. Weaver en los años 50, este método no requiere del uso de filtros de corte brusco ni redes de diferencia de fase de 90° de banda ancha. En la figura 6-49 se ve el diagrama en bloques que permite obtener **BLU** y las relaciones básicas involucradas. En el punto A la señal de audio $V_m(t)$ se supone con forma cosenoidal con componente de frecuencia f_m dentro de la banda de 300 a 3300 Hz. La onda de audio se inyecta a los moduladores balanceados 1 y 2 con las componentes de cuadratura indicadas de una frecuencia de portadora $\omega_0 = 2\pi f_0$, donde f_0 se escoge de 1800 Hz, exactamente en el centro de la banda de audio. Las salidas resultantes de los moduladores en los puntos B y C consisten en dos bandas de frecuencias: de 0 a 1500 y de 2100 a 5100 Hz, con una separación igual al doble de la frecuencia de audio más baja. De este modo, los filtros pasa-bajos pueden eliminar fácilmente la banda superior, permitiendo en pasaje de la banda que va de 0 a 1500 Hz.

Las componentes de salida de filtro en los puntos D y E se combinan en los moduladores balanceados 3 y 4, respectivamente, con señales en cuadratura procedentes de una fuente de frecuencia f_c , que es el centro de banda de la señal de banda lateral única final. Como se muestra en el diagrama, cuando la salida de los moduladores 3 y 4 en los puntos F y G se suman, se cancela un par de componentes y el otro par se suma para dar la onda BLU deseada. En el caso de balanceado impropio de los moduladores o de faseamiento de las señales en cuadratura, la banda lateral indeseada aparece en la misma banda de frecuencia que la deseada, sólo que invertida.

**Fig. N° 6 - 48**

APENDICE 1 – Filtros Mecánicos**Filtros Mecánicos de Torsión:**

El filtro mecánico es un dispositivo muy utilizado en la generación de señales de BLU, su frecuencia de operación es relativamente baja, del orden de 60 a 600 Khz., con un ancho de banda comprendido entre el 0,05% y el 5%., con pérdidas de inserción del orden de 1 a 10 dB. Algunos parámetros típicos para un filtro de 455 Khz. son:

- Ancho de banda para 6 dB de atenuación: 2,1 Khz.
- Ancho de banda para 60 dB de atenuación: 5,3 Khz.
- Impedancia de acoplamiento: $5\text{ K}\Omega \pm 2,25\text{ K}\Omega$
- Pérdida de Inserción: 9,5 dB
- Ripple máx. de la banda pasante: 3 dB
- Tensión de entrada: 2 Vrms máx.

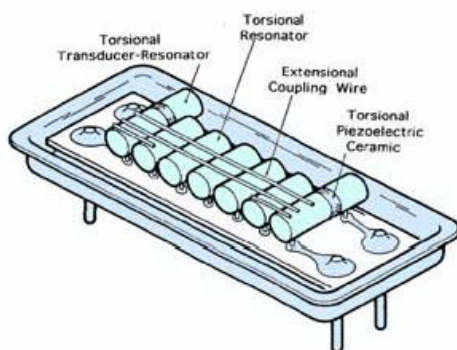
La alta selectividad que presentan se logra mediante el uso de una serie de discos resonantes de aleación de níquel con un Q del orden de 8.000 a 12.000. Los Filtros mecánicos son eléctricamente y mecánicamente estables y resistentes al envejecimiento, averías y variaciones con cambios de temperatura extremos. Por ejemplo, el cambio de frecuencia de un Filtro Mecánico típico se mantiene entre 1.5 y 2 partes por el millón/°C en un rango de temperatura de -25°C a +85°C. Los filtros mecánicos presentan una elevada resistencia al envejecimiento, en los ensayos de envejecimiento acelerado, en los cuales filtros de características standard son sometidos a variaciones cíclicas entre 25°C y 90°C durante un periodo de ocho meses, el resultado es que la desviación máxima que exhiben resulta de menos de una parte por millón.

Principios de Funcionamiento

Estos dispositivos son resonadores mecánicos, los que reciben energía eléctrica, la convierten en vibraciones mecánicas, filtran las frecuencias no deseadas y luego vuelve a convertir la energía de vibración mecánica en eléctrica. Los filtros mecánicos consisten en tres elementos básicos:

- Transductor de entrada salida: estos convierten las oscilaciones eléctricas en oscilaciones mecánicas y viceversa.
- Resonadores: son discos de metal que resuenan mecánicamente.
- Acopladores: son varas de acoplamiento que permiten que la señal llegue a los resonadores.

Un esquema que permite ver internamente la construcción de un filtro mecánico se puede ver en la siguiente gráfica:

**Fig. N° 6 – 49**

El transductor que convierte energía eléctrica en mecánica es un dispositivo basado en la propiedad que presentan ciertos materiales debido a la cual se alargan o acortan en presencia de un campo magnético. La señal eléctrica se aplica a través de una bobina cuyo núcleo lo constituye el material indicado anteriormente. De esta forma la oscilación eléctrica se convertirá en una oscilación mecánica, además el transductor provee también una terminación apropiada para aplicar esta vibración a la red mecánica compuesta por los resonadores de torsión.

En el circuito equivalente, cada disco de metal (resonadores de torsión) es representado por un circuito resonante paralelo, por lo que al aumentar el número de discos mejora la selectividad del filtro. La selectividad se especifica como el factor de forma, que es la relación entre el ancho de banda de 60 dB debajo de la cresta y el ancho de banda de 6 dB debajo de la cresta.

En el circuito equivalente, las varas que acoplan los discos, son representadas como inductores de acoplamiento. Variando el acoplamiento mecánico entre los discos, es decir, haciendo las varas de acoplamiento más grandes o más pequeñas, se varía el ancho de banda del Filtro. Dado que el ancho de banda varía aproximadamente con la superficie total del alambre de acoplamiento, los anchos de banda pueden ser aumentados usando varas de acoplamiento más grandes o mayor cantidad de ellas. Los anchos de banda disponibles van desde 500 Hz a 50 khz, aunque existen diseños especiales con anchos de banda tan estrechos como 300 Hz y tan anchos como 60 khz.

El uso de transductores de ferrita, reduce la pérdida de inserción y ripple en la banda pasante, mientras que el uso de varios tipos de filtros en cascada mejora la selectividad y reduce la microfonía.

Mediante el tratamiento térmico adecuado de los discos de aleación de níquel de los elementos resonantes, se logran coeficientes de temperatura tan bajos como una parte en uno millón por el grado Centígrado en un rango de 100 °C.

Selectividad

Los filtros mecánicos son construidos con un número de polos entre 2 y 12. La Selectividad es una función directa del número de polos y del tipo de diseño. La figura siguiente muestra la selectividad para un filtro tipo Chebyshev de .01 dB de ripple, en este caso con curvas para 3, 5, 7, 9 y 11 polos, El ancho de banda de 3 dB de todos ellos es de 3 khz.

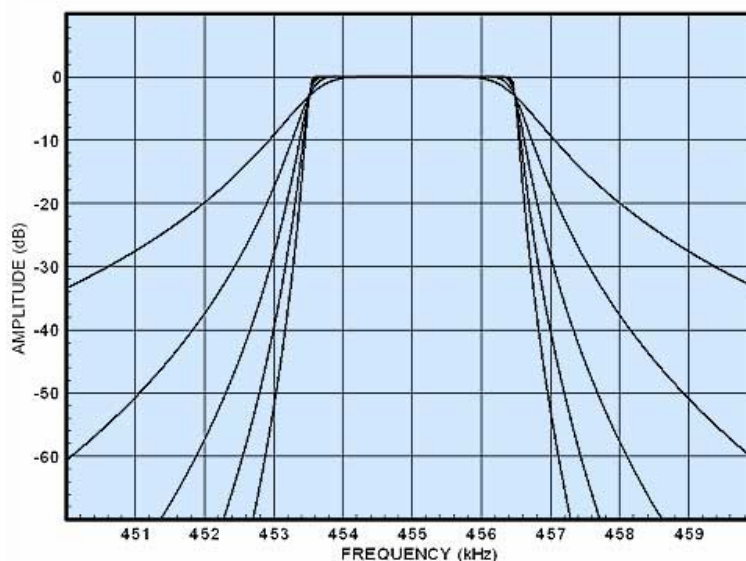


Fig. N° 6 – 50 (Diseño de 3, 5, 7, 9 y 11 polos)

Un diseño distinto, según una función de Butterworth mejora su estabilidad pero reduce la selectividad. Para una estabilidad óptima, se utilizan en la mayoría de los filtros de más de tres polos, diseños que van de Butterworth a Chebyshev para .05 dB de ripple.

Ripple

Los filtros se diseñan con modelos teóricos y con un ripple menor de .05 dB. El ripple real, debido a las variaciones del proceso de fabricación, será más alto. Un filtro económico típico tiene a temperatura ambiente un ripple menor que 1 dB. El valor del ripple incluyendo las variaciones provocadas por los cambios de temperatura se especifica de una forma conservadora como menos de 3 dB.

El ripple se define de varias maneras, la definición utilizada mas frecuentemente es la diferencia entre la pérdida mínima y el valle mas pronunciado dentro de la banda pasante. Otro método menos usado es medir la mayor diferencia entre un pico y un valle adyacente.

Pérdida de Inserción

La pérdida de la inserción, para los filtros de torsión, es típicamente 2 dB o menor para filtros con un ancho de banda mayor que 1 KHz. Los filtros de menor ancho de banda, pueden presentar pérdidas de inserción mayores, pudiendo alcanzar valores del orden de hasta 10 dB. La pérdida aumentará con temperatura y se duplicará casi a las 85°C.

Retardo

El retardo también es una función del número de polos y tipo de diseño. Un filtro de Chebyshev tiene usualmente más retraso que un filtro de Butterworth. El retraso para un filtro de Chebyshev de .01 dB de ripple y 3 khz de ancho de banda se muestra en la siguiente figura:

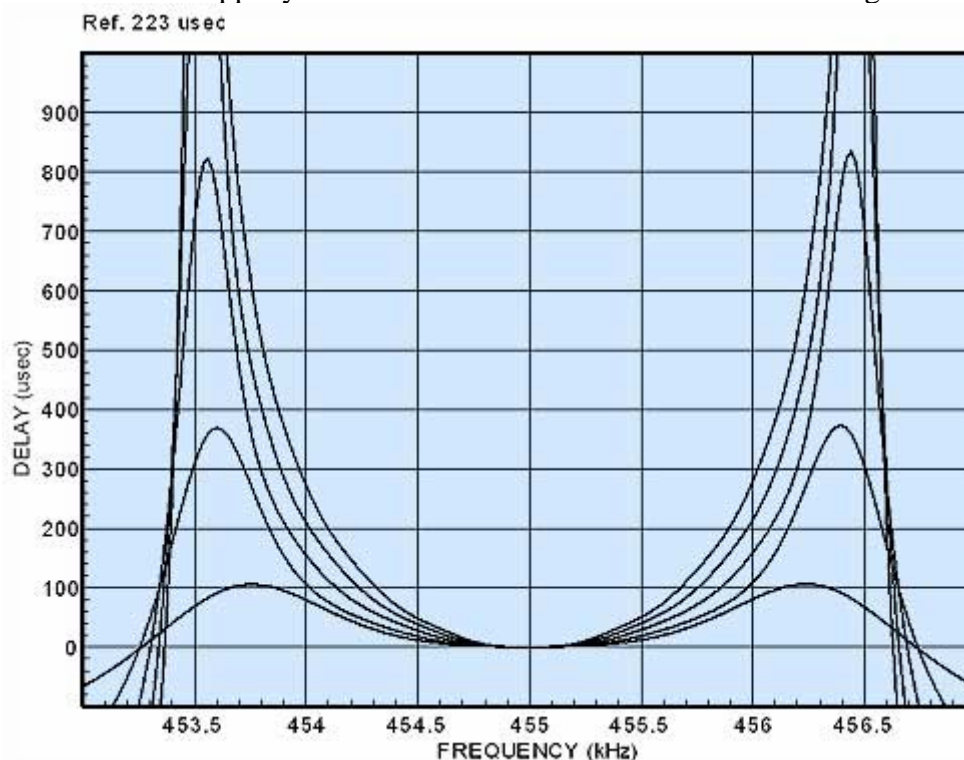


Fig. N° 6 -51 (Diseño de 3, 5, 7, 9 y 11 polos)

Filtros Mecánicos de Flexión:

Se trata de otro tipo de filtros mecánicos que funcionan con barras que operan en flexión, estos se utilizan en baja frecuencia, donde sus frecuencias centrales van desde 5 a 100 khz y anchos de banda de 0.2 a 1.5 %, un ejemplo se puede ver en la siguiente gráfica:

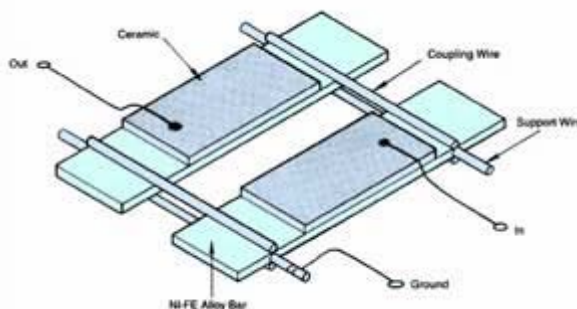


Fig. N° 6 - 52

Aplicaciones:

Las aplicaciones de estos filtros son muy variadas, se utilizan en equipos transmisores, receptores, equipos multiplex, sistemas de guía de proyectiles, sintetizadores de frecuencia, radar de Doppler, sistemas de transmisión de datos, equipo de navegación de precisión y analizadores del espectro.

El diseño de circuitos que emplean filtros mecánicos es relativamente simple, no requiriendo adaptadoras especiales, solamente se deben aplicar a sus terminales los valores de resistencia y capacidad de entrada y salida sugerida por el fabricante. En muchas aplicaciones es deseable terminar el filtro en una carga balanceada. Por esta razón muchas veces los terminales de entrada y salida son balanceados, eliminándose la necesidad de utilizar transformadores de aislamiento. Un circuito de ensayo de estos filtros es el siguiente:

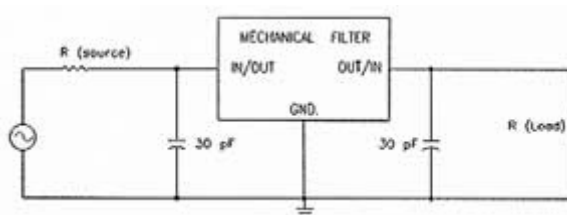


Fig. N° 6 – 53

Encapsulados Típicos : Algunos encapsulados típicos se pueden ver en la siguiente gráfica:

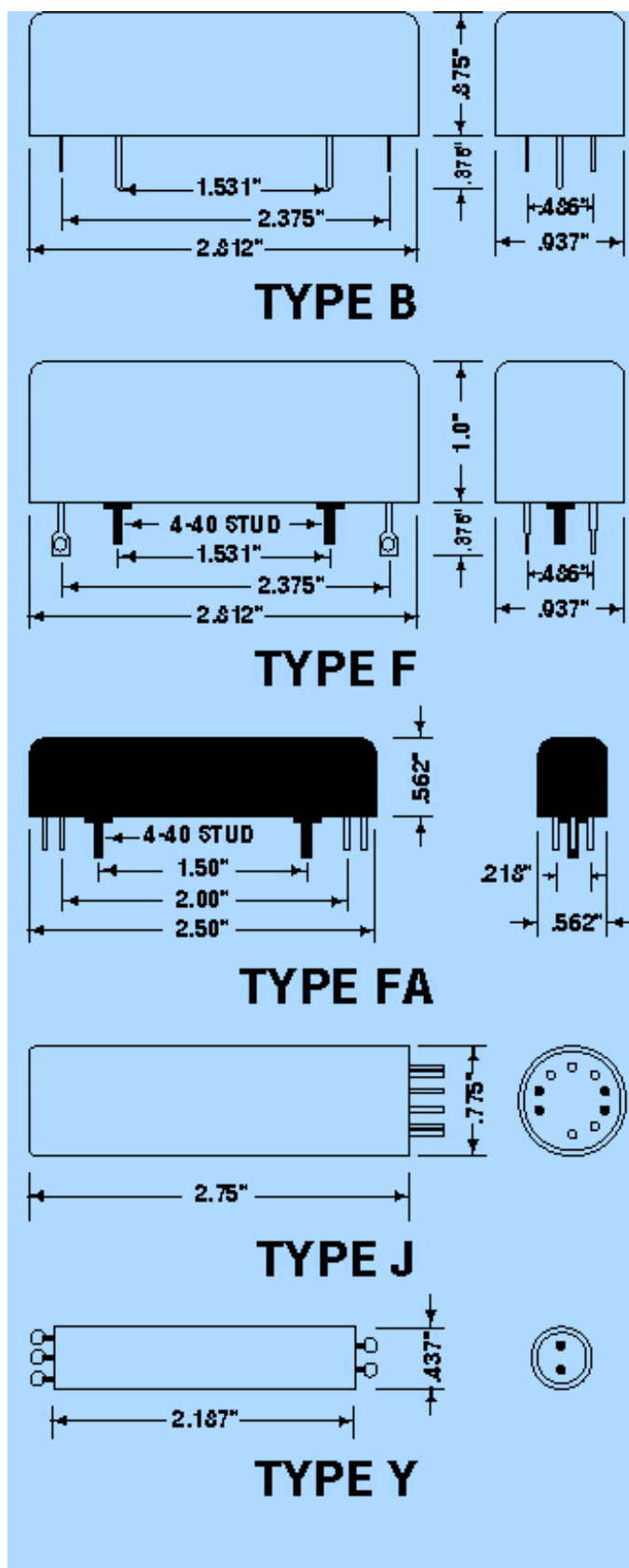


Fig. N° 6 - 54