

Transmisiones en AM y FM

Alfonso Cuesta Hernández

17 de abril de 2001

En una comunicación telefónica, al hablar una persona, la señal eléctrica circula a través de los cables; pero, ¿por qué son necesarios los cables?.

La razón es que las señales de voz no se pueden transmitir a través del espacio a costos asequibles por lo tanto, la información contenida en dicha señal se "monta" en una portadora que facilite sus transmisión. Además, si se quiere transmitir la señal de varios teléfonos simultáneamente por la misma línea, las señales sin "montar" en portadoras se mezclarían por ser todas de audio. Este inconveniente se soluciona *modulando* a diferentes portadoras, cada una con una frecuencia diferente, con cada información; de esta manera el receptor deberá primero reconocer la portadora y después la información contenida dentro de ella.

El término modular significa, en el sentido de la electrónica, cambiar algún parámetro de una señal llamada *portadora*, para ello se emplea otra señal llamada "información". El objeto de la modulación es poder transmitir información de baja frecuencia a través del espacio que, como vehículo utiliza a una señal portadora.

En una señal AM, la modulante es la amplitud de la portadora. Para mejor conocer una señal de AM, definimos la expresión tanto de la portadora como de la señal modulante:

- **Modulante:** $e_m(t) = A_m \sin \omega_m t$

En donde:

- $e_m(t)$ = tensión instantánea de la modulante.
- A_m = amplitud pico de la modulante.
- ω_m = pulsación angular de la modulante ($2\pi f_m$).

- **Portadora:** $e_p(t) = A_p \sin \omega_p t$

En donde:

- $e_p(t)$ = tensión instantánea de la portadora.
- A_p = amplitud pico de la portadora.
- ω_p = pulsación angular de la portadora.

Si la señal de AM la llamamos $X(t)$ la amplitud de la portadora A_p variará con $e_m(t)$ es decir:

$$\begin{aligned} X(t) &= [A_p + e_m(t)] \sin \omega_p t \\ &= [A_p + A_m \sin \omega_m t] \sin \omega_p t \\ &= \underbrace{A_p \sin \omega_p t}_{\mathbf{A}} + \underbrace{A_m \sin \omega_m t \sin \omega_p t}_{\mathbf{B}} \end{aligned} \quad (1)$$

De la expresión anterior se puede observar que el término **A** es la señal portadora y el **B** es la parte que contiene la información.

Desarrollando la ecuación 1 tenemos:

$$\begin{aligned} X(t) &= A_p \sin \omega_p t + A_m \left[\frac{\cos(\omega_p + \omega_m)t - \cos(\omega_p - \omega_m)t}{2} \right] \\ &= A_p \sin \omega_p t + \frac{A_m}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t - \frac{A_m}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t \end{aligned} \quad (2)$$

Es evidente de la ecuación 2 que los dos últimos términos son los portadores de la información (BLS y BLI) y que el primero es el término de la portadora. De aquí que al aplicar la transformada de Fourier a esta ecuación se observen dos impulsos de igual magnitud, uno colocado a la frecuencia $\omega_p - \omega_m$, otro a $\omega_p + \omega_m$ y un último en el centro de estos dos, con una magnitud mayor, centrado en ω_p .

Concretemos lo aprendido con un ejemplo.

Analicemos el comportamiento en función de la frecuencia de una portadora de 100 KHz modulada con la voz de un locutor.

Es sabido que el espectro de la voz comprende, aproximadamente, entre 20 Hz y 20 KHz con una mayor intensidad para los tonos medios y una menor para los graves y los agudos. Denotamos a f_m como la frecuencia media promedio de la voz y a f_g y a f_a como las frecuencias medias para tonos graves y agudos respectivamente. Por lo tanto, después de modular la voz del locutor, el espectro de la señal AM se vería como dos "bandas" de magnitud igual a un medio de la original a cada lado de un impulso centrado en la frecuencia ω_c . Nótese, entonces, que la información aparece a ambos lados de la portadora sin ninguna distorsión aparente pero con la mitad de su amplitud. Es decir, la información aparece por duplicad en bandas a los costados de la portadora. A estas bandas se les conoce como **bandas laterales**. A la banda que se ubica por encima de la portadora se denomina **Banda Lateral Superior (BLS)** y a la que está por debajo, **Banda Lateral Inferior (BLI)**.

Si observamos, con no mucho detenimiento, la ecuación 2 notaremos qué términos del lado derecho corresponde a la BLI y a la BLS.

0.0.1 Índice de modulación.

La ecuación 2 suele darse en otro formato en la que se nota la relación de la amplitud de la portadora y de la modulante.

Si multiplicamos y dividimos los términos correspondientes a la BLI y a la BLS por A_p obtenemos

$$X(t) = A_p \sin \omega_p t + \frac{A_p A_m}{2A_p} \cos(\omega_p + \omega_m)t - \frac{A_m A_p}{2A_p} \cos(\omega_p - \omega_m)t$$

utilizando $m = \frac{A_m}{A_p}$ en la ecuación anterior obtenemos

$$X(t) = A_p \sin \omega_p t + \frac{mA_p}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t - \frac{mA_p}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t \quad (3)$$

en donde el término

$$m = \frac{A_m}{A_p} \quad (4)$$

es conocido como **índice de modulación**.

El índice de modulación comprende valores entre 0 y 1. Si no existe modulante $m = 0$, una señal plenamente modulada $m = 1$ y una sobremodulación $m > 1$. Ésta última condición ocasiona la imposibilidad de detectar la envolvente en condiciones normales. A este fenómeno se le conoce en la jerga de las comunicaciones como *salpicado* pues afecta la recepción de emisoras con frecuencias adyacentes.

0.0.2 Modulación en Banda Lateral Única

Los sistemas de doble banda lateral tienen un rendimiento demasiado bajo que no supera el 17% y además requieren un ancho de banda, por lo menos, del doble de la frecuencia máxima de la información. El concepto de *Banda Lateral Única (BLU)* pretende paliar estas deficiencias y mejorar el rendimiento de un sistema AM en general.

0.0.3 Consideraciones sobre BLU.

La transmisión en BLU consiste en suprimir la portadora y una de las bandas laterales; por lo tanto, se transmite solamente la banda restante que contiene totalmente la información.

En un sistema AM las bandas laterales son realmente "espejos" una de otra y cualquiera de ellas puede elegirse para recuperar la información que contienen. De esta manera, si transmitimos una sola banda lateral, el sistema requerirá de un ancho de banda igual al de la información, ya no del doble, con lo cual se consigue una conservación del espectro de frecuencias.

Supongamos que queremos modular una señal que tiene componentes de frecuencias entre 300 Hz y 3 KHz. Por lo tanto el ancho de banda del sistema será de 6KHz y su rendimiento no sobrepasará del 17%. Si transmitimos en BLU, eliminamos la portadora y una de las bandas laterales; así, es posible transmitir el doble de los canales utilizando BLU.

En teoría, el rendimiento de un sistema BLU es bastante superior que el de otro de AM ya que en este último, para transmitir aproximadamente 17 w de información necesitaríamos generar 100 w, mientras que uno BLU sólo necesita los 17 w correspondientes a la banda a transmitir. De la misma forma, la reducción del ancho de banda mejora la relación señal-ruido.

En cuanto a la propagación de las señales, en principio, ningún sistema presenta ventaja sobre el otro. En presencia de condiciones atmosféricas pobres las señales de BLU tienden a desvanecerse sin perder su contenido. Correspondientemente, la señal de AM puede ser anulada o atenuada en el lugar de la recepción debido a desfases entre la portadora y las bandas laterales, causado, principalmente, por trayectorias múltiples que se pueden anular o causan la llamada *distorsión armónica* o *distorsión por intermodulación*.

Dado que en las señales de BLU sólo existe una componente, la atenuación sólo puede ser de manera parcial sin provocar distorsiones causadas por el desfase entre la portadora y la banda lateral. En cambio, las señales de BLU sólo puede sufrir lo que se denomina *distorsión de amplitud* en función de la frecuencia, que puede provocar una merma en la fidelidad de la recepción sin afectar demasiado la inteligibilidad de la información.

0.0.4 Expresión matemática de la señal de la señal BLU.

La señal de doble banda lateral se expresa como sigue

$$DBL = A_m \sin \omega_p t \sin \omega_m t$$

de manera equivalente

$$DBL = \frac{A_m \cos(\omega_p - \omega_m)t}{2} - \frac{A_m \cos(\omega_p + \omega_m)t}{2}$$

En el sistema de BLU, luego de la supresión de la portadora se atenúa una banda lateral de modo que se transmite solamente la banda restante. Si, por ejemplo, se envía un espectro de señales desde 300Hz hasta 3KHz como información, la señal BLU no será de frecuencia fija y amplitud constante; la amplitud variará al ritmo de la información y la frecuencia también, pero desplazada a un costado de la portadora; es decir, si la portadora es de 100KHz, todo el espectro de frecuencias se encontrará a partir de esta frecuencia hasta los 103KHz.

Como se puede ver, ahora la señal transmitida, por completo, posee inteligencia y el ancho de banda se ha reducido a la mitad, o si se prefiere, se puede transmitir el doble de canales.

Si bien sigue siendo vulnerable al ruido impulsivo, ahora no existe distorsión por intermodulación porque se transmite una componente luego de la ausencia de la portadora y una de las bandas laterales.

Una vez que la señal BLU llega al receptor, la señal se amplifica y luego se detecta en forma ligeramente diferente a la común. Para realizar dicha detección se debe generar en el receptor una portadora que permita el batido con la señal sintonizada exactamente idéntica en fase y frecuencia a la utilizada en el modulador. Si la frecuencia de la señal generada localmente, por algún motivo, variara, la frecuencia de la señal resultante del batido estaría desplazada y no representaría verdaderamente la señal de modulación original.

De manera común, la desviación de la frecuencia de la portadora generada localmente en el receptor debe ser inferior a los 50Hz, ya que un cambio superior a los 200Hz puede causar suficiente corrimiento en la frecuencia de la señal como para hacerla ininteligible.

Por lo anterior, la estabilidad de la frecuencia del oscilador local de un receptor de BLU es uno de los requisitos más críticos del sistema. En algunas ocasiones, junto con la BLU, se transmite una portadora piloto que permita el sincronismo entre el transmisor y el receptor. A esta variante se le llama *BLU con portadora reducida* y en el receptor se separa el piloto (generalmente con 20dB de atenuación con respecto a la información) antes de la demodulación; el piloto se emplea para regenerar una portadora de igual frecuencia denominada *portadora de reinserción o portadora exaltada*.

Los sistemas de BLU se diseñan para transmitir señales con frecuencias superiores a los 300Hz, pero si se quiere transmitir una señal de menor frecuencia resulta muy difícil diseñar un sistema que atenúe totalmente la banda lateral no deseada. Para solucionar este problema, juntamente con la banda lateral deseada se transmite una porción de la banda lateral no deseada; así se obtiene el *sistema de banda lateral vestigial* empleado en la señal de video en televisión.

0.0.5 Transmisor de BLU básico.

Si bien existen dos formas de generar un señal de BLU, el método clásico, consiste en eliminar la portadora mediante el uso de un modulador balanceado y posteriormente, por medio de un filtro, eliminar la banda lateral innecesaria aprovechando la propiedad de que entre banda y banda existe un espacio de 600Hz sin información (el ancho de banda de la información, normalmente, abarca desde los 300Hz hasta los 3KHz.)

De este modo un transmisor básico de BLU necesita un amplificador de audio para adecuar el nivel de la información al modulador, un modulador balanceado, un oscilador local calibrado a la frecuencia de la portadora, un filtro pasa altas para eliminar la banda lateral innecesaria y al final un amplificador lineal de radio frecuencia para que la señal llegue a la antena con la potencia adecuada.

Un modulador balanceado es un circuito que recibe como entradas dos señales y entrega como resultado su producto.

De la expresión de la señal de AM (ecuación 1) tenemos

$$\begin{aligned} A_p \sin \omega_p t &= V_1(t) &\Rightarrow & \text{portadora} \\ A_m \sin \omega_m t &= V_2(t) &\Rightarrow & \text{modulante} \end{aligned}$$

Con el objeto de demostrar el funcionamiento teórico del modulador balanceado, simplificamos las expresiones anteriores al tomar a A_p como una constante igual a 1. Luego

$$\begin{aligned} V_1(t) &= \sin \omega_p t \\ V_2(t) &= A_m \sin \omega_m t \\ AM(t) &= \sin \omega_p t + A_m \sin \omega_m t \sin \omega_p t \end{aligned}$$

Remplazando $\sin \omega_p t$ por $V_1(t)$ y $A_m \sin \omega_m t$ por $V_2(t)$ se tiene

$$AM = V_1(t) + V_1(t)V_2(t)$$

La señal con doble banda y portadora suprimida es aquella en la cual se transmite solamente las bandas, sin la información de la portadora en sí, es decir

$$DBL(t) = V_1(t)V_2(t)$$

Efectivamente, un modulador balanceado es aquel en el que ingresan dos señales y se entrega el producto de ambas.

0.0.6 Filtros para BLU.

Para generar una señal de BLU, básicamente existen dos métodos, uno de ellos consiste en generar una señal de Doble Banda Lateral (DBL) con un modulador de producto y luego, por medio de un filtro, se extrae la banda lateral seleccionada. El otro consiste en generar la señal de BLU por cambios de fase de la portadora y la modulante. El receptor debe ser el mismo para cualquiera de los dos métodos, o sea, no debe necesitar saber cómo se ha generado la señal.

En electrónica, se denomina filtro a un circuito que permite el paso de señales de determinadas frecuencias y atenúa el resto.

Existen cuatro tipos básicos de filtros: *pasa bajas*, *pasa altas*, *pasa banda* y *rechaza banda*. Cada uno deja pasar una porción de frecuencias, los nombres de los filtros describen de manera excepcionalmente clara el comportamiento de cada uno.

Estos filtros poseen una curva de respuesta en frecuencia que determina su transferencia. Estas curvas de respuesta tendrán una *frecuencia de corte* que será aquella para la cual la transferencia cae al 70% de su valor máximo y una pendiente de atenuación que indicará la forma en que la respuesta cae con la frecuencia y que

depende de la pérdida que posean los elementos del filtro y su relación con la carga conectada a la salida de los mismos.

De este modo, un filtro pasa bajas ideal, es aquel que deja pasar sin atenuación, a todas las frecuencias debajo de una frecuencia de corte e impide, por completo, el paso de las que se encuentran después de esta. En realidad es imposible construir filtros ideales de cualquier tipo y dicho elemento tendrá una *pendiente de atenuación* existiendo una banda de frecuencias para la que se produce la transición desde máxima transferencia a atenuación total o viceversa.

La frecuencia de corte del filtro depende del valor de los componentes pasivos que lo integran y la pendiente de atenuación de la relación de estos con la impedancia de carga. Según el tipo de filtro que se trate, la impedancia de carga podrá influir también en la frecuencia de corte.

La pendiente de transferencia del circuito depende de su factor de mérito o selectividad (Q) tal que cuanto mayor sea el Q más selectivo será el filtro.

$$Q = \frac{R_L}{X_L}$$

Donde X_L se calcula para la frecuencia de resonancia y R_L es la impedancia de carga.

Para un sistema de BLU se necesitarán filtros en transmisión, que eliminen o atenuen lo suficiente una banda lateral y dejen pasar completamente a la restante. Como es posible que el filtro tenga un corte abrupto, se trata de que la transición desde máxima atenuación hasta mínima sea lo más reducida posible.

Así por ejemplo, si un filtro pasa altas posee una frecuencia de corte de 100KHz y se considera que debe presentar atenuación aceptable para 98KHz, la transición de frecuencias Δf para la cual el filtro presenta características intermedias será de 2KHz.

Se denomina *complejidad del filtro* a la relación entre la frecuencia de corte f_c y la transición de frecuencias Δf . Matemáticamente.

$$C = \frac{f_c}{\Delta f}$$

Evidentemente, a medida que esta relación sea más grande más nos acercaremos al filtro ideal.

En ocasiones se prefiere hablar de la distorsión o deformación del filtro que es el inverso de su complejidad y suele denominarse con la letra G .

$$G = \frac{1}{C} = \frac{\Delta f}{f_c}$$

Como este valor suele ser muy pequeño se conviene en hablar de deformación o distorsión porcentual del filtro.

$$G\% = \frac{\Delta f}{f_c} 100\%$$

0.0.7 Generación de la señal de BLU por el método del filtro.

Recordemos que al modulador balanceado entran la información a transmitir y la señal portadora con la cual se obtiene una señal DBL y, luego, por medio de un

filtro se obtiene la señal BLU.

Existen muchas variantes de moduladores balanceados; sin embargo, para obtener la salida en BLU cada una de las bandas laterales puede pasar o rechazarse empleando el filtro apropiado. Si bien se pueden adaptar distintos tipos de filtros, éstos deben reunir las condiciones mínimas de complejidad y potencia; así es común el uso de filtros LC elaborados, muchas veces activos y también pueden encontrarse redes construidas con cristales de cuarzo. Los requerimientos de diseño del filtro son los factores primordiales que determinan la frecuencia en la que debe funcionar el oscilador local.

El diseño de filtros con una G menor que el 10% son casi imposibles o muy complejos y costosos por lo que en la práctica, suelen producirse bandas laterales modulando sobre una portadora de RF de baja frecuencia, generalmente de entre 100 y 300Hz, donde se pueden conseguir filtros de buena calidad con facilidad; luego en una posterior modulación se monta a la información sobre una segunda portadora cuya frecuencia es la realmente deseada.

0.1 Transmisiones de FM.

En la sección anterior analizamos cómo se realiza una transmisión de AM de forma más o menos detallada con un buen contenido matemático. Sin embargo, el análisis matemático que permite obtener de la señal de FM no es tan sencillo y demanda un análisis un poco más detallado. Dado que el objeto de este trabajo no es ahondar demasiado en la teoría se ha decidido obviar este trecho, por lo que comenzaremos con una sencilla definición de la señal de FM.

Modular en FM significa variar la frecuencia de la portadora al ritmo de la información. Lo que significa que en la señal de FM, la amplitud y la fase permanecen constante y la frecuencia varía en función de los cambios de amplitud y frecuencia de la señal que se desee transmitir.

Una emisora de frecuencia modulada debe poseer una etapa amplificadora de audio que lleve la información que se desea transmitir a los valores adecuados para que en el oscilador local provoque una desviación de frecuencia máxima de 75KHz.

El circuito de un transmisor de FM, debe incluir también, una etapa de *preenfasis* con una constante de tiempo de $50\mu s$ con el objeto de amplificar los tonos bajos, que a su vez, causan un bajo índice de modulación.

La señal de salida del amplificador debe permitir la variación de frecuencia que genera un oscilador de portadora. Casi siempre, en los circuitos transmisores básicos, esta frecuencia es variable por medio de la polarización de un diodo varicap que forma parte del circuito resonante LC de realimentación del generador de portadora.

La señal de salida del oscilador es directamente la señal de frecuencia modulada que debe amplificarse antes de ser conducida a la antena. Los amplificadores RF no necesariamente deben ser lineales ya que si hay alguna deformación en la amplitud de la señal, ésta, no afectará la información que transporta la portadora, ya que la misma viene en cambios de frecuencia y no de amplitud. Esto es una ventaja ya que se puede utilizar una etapa de amplificación clase A, con lo cual se tendrá un muy buen rendimiento sin que peligre la fidelidad de la información contenida.

Por lo dicho conviene que los pasos de amplificación de la señal modulada en baja potencia sean con etapas clase A que son de bajo rendimiento, pero casi no producen armónicas; mientras que la etapa de potencia debería ser de clase B para disminuir los costos y mejorar el rendimiento.

Las partes de una etapa transmisora de FM son:

- Microfono o fuente de información.
- Amplificador de audio.
- Oscilador de frecuencia variable controlado por la información (VCO).
- Amplificador de clase A y un filtro.
- Amplificador de RF clase A y un filtro.
- Amplificador de RF clase B de potencia.
- Filtro.
- Antena.

En síntesis, el circuito se compone de una primera etapa que actúa como amplificador de baja frecuencia (audiofrecuencia) seguido de un oscilador de radiofrecuencia (RF) que actúa además como modulador. Luego deben existir etapas amplificadoras de RF con las que se logra el nivel de señal adecuado para la antena.

0.1.1 El amplificador de baja frecuencia.

Se trata de la etapa destinada a amplificar la señal de audio correspondiente a la información para que la misma posea una amplitud máxima del orden de los 500mV. Se puede colocar cualquier etapa amplificadora que esté ecualizada para poder recibir la señal del transductor que se desea.

Se debe recordar que con el objeto de compensar el bajo índice de modulación que producen las señales de alta frecuencia, se debe incluir en el amplificador una red de preénfasis que permita amplificar más las señales de alta frecuencia que las de baja.

0.1.2 Oscilador-modulador.

La información proveniente de la etapa de baja frecuencia recién analizada debe permitir variar el valor de alguno de los elementos que determina la frecuencia del oscilador. Para esta aplicación es muy común el uso de diodos varicap que produzcan una variación de capacidad tal que la máxima desviación de frecuencia para 100% de modulación sea $\pm 75\text{KHz}$. En este caso la frecuencia central del oscilador estaría dada para una polarización del varicap sin señal, luego, la información se sumará con su correspondiente signo a dicha polarización y así permitirá la debida desviación de frecuencia.

0.1.3 Amplificadores de RF en clase A.

La señal de RF modulada procedente del oscilador es enviada al primer paso amplificador constituido por una etapa en clase A con el objeto de aumentar el nivel de la señal sin generar un gran contenido armónico que podría provocar interferencia en otras bandas.

0.1.4 Amplificador de salida de RF.

Se ha mencionado la necesidad de que la etapa de salida de RF funcione en clase B con lo que se consiguen rendimientos del orden del 50%, de esta manera el transmisor amplificador podrá operar sin un excesivo calentamiento, con lo cual no serán necesarios disipadores de calor voluminosos si se trabajan con potencias de salida del orden del watt. Esta etapa recibe la señal del amplificador anterior por la base de un transistor que se encuentra en masa, para corriente continua, a través de un choque de RF.

0.1.5 Transmisión estéreo de FM.

En un sistema de transmisión de FM estéreo el audio se recibe por dos micrófonos que captan sonidos desde lugares distantes (que llamaremos sección izquierda y derecha.) El procesamiento de estas señales se lleva a cabo en sendos canales designados derecho e izquierdo. Las señales procesadas se combinan de dos maneras

distintas; así, por ejemplo, para el mezclador monoaural se deben sumar las señales de ambos canales y la información obtenida queda en la frecuencia comprendida entre 0 y 15KHz.

El segundo canal recibe un tratamiento más complicado. Se tiene un mezclador estéreo que toma la diferencia de las dos señales procesadas provenientes de los dos micrófonos; la señal así formada queda en la banda de 0 a 15KHz. Esta señal se inyecta a un modulador balanceado donde modulará a una portadora de 38KHz proveniente de un generador de subportadora. La salida del modulador balanceado proveerá las bandas laterales inferior (23 a 38KHz) y superior (38 a 53KHz) además de otras señales que son eliminadas por un filtro que sólo deja pasar señales con frecuencias comprendidas entre 23 y 53KHz. Al mismo tiempo se elimina la portadora de 38KHz.

Los grupos finales que modularán en el transmisor a la frecuencia portadora son: (0-15KHz) que presenta la suma de los dos canales; (23-35KHz) que presenta la diferencia de los dos canales y la señal de 19KHz, derivada de la señal subportadora de 38KHz que servirá para recepcionar y detectar con facilidad la señal diferencia en el receptor.