

MODULACIÓN DIGITAL	2
1.- Definiciones:	2
2.-Tasa de Transferencia de Información (Information transfer rate).....	3
3.- Tasa de Señalización, o velocidad de transferencia de símbolos	3
4.-Eficiencia del ancho de banda o eficacia espectral	4
5.- Probabilidad de error P(e) y error de transferencia de bit (B E R).....	4
6.- Espectro y ancho de banda del tren de pulsos de la banda base.	4
7.- ASK o modulación por desplazamiento de amplitud.....	5
7a.- Generación, espectro y ancho de banda en ASK.....	7
7b.- Detección de ASK	9
7c.- Aclaración respecto del ancho de banda y roll off	10
8.-FSK o modulación por desplazamiento de frecuencia.	13
8a.- Generación de FSK.....	13
8b.- Ancho de banda en FSK.....	16
8c.- Detección de FSK.....	17
9.- PSK o Modulación por desplazamiento de fase.....	18
9a.- Generación de PSK.....	18
9b.- Espectro y ancho de banda de la señal PSK.....	20
9c.- Generación de BPSK	21
9d.- Detección BPSK.....	24
d1.-Bucle elevador al cuadrado	24
9e.- QPSK o modulación por desplazamiento de fase cuaternaria	27
e1.- Generación de QPSK.....	28
e2.-Ancho de Banda en QPSK	28
e3.-Detección QPSK.....	29
e4.- 8PSK.....	29
e5.-16PSK.....	30
9f.-DBPSK –Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria Diferencial	30
f1.-Generador DBPSK	30
f2.-Detector DBPSK.....	31
10-QAM o modulación de amplitud en cuadratura.....	32
10a.-8QAM.....	32
10b.-16QAM	32
11.- Comparación de BW y Eficiencia de la Modulación Digital	37

Bibliografía:

- .- Manuel Sierra Pérez, 2003, Electrónica de Comunicaciones, Pearson
- .- Krauss-Bostian-Raab, 1984, Estado Sólido en Ingeniería de Radiocomunicación, Limusa
- .- Clarke & Hess, 1978, Communications Circuits:Analysis and Design, Addison - Wesley
- .- Wayne Tomasi, 2003, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas

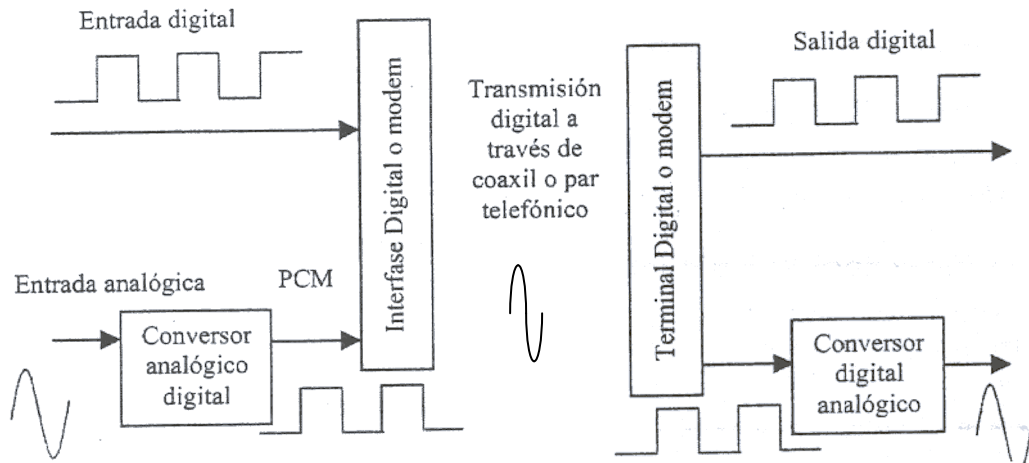
MODULACIÓN DIGITAL

1.- Definiciones:

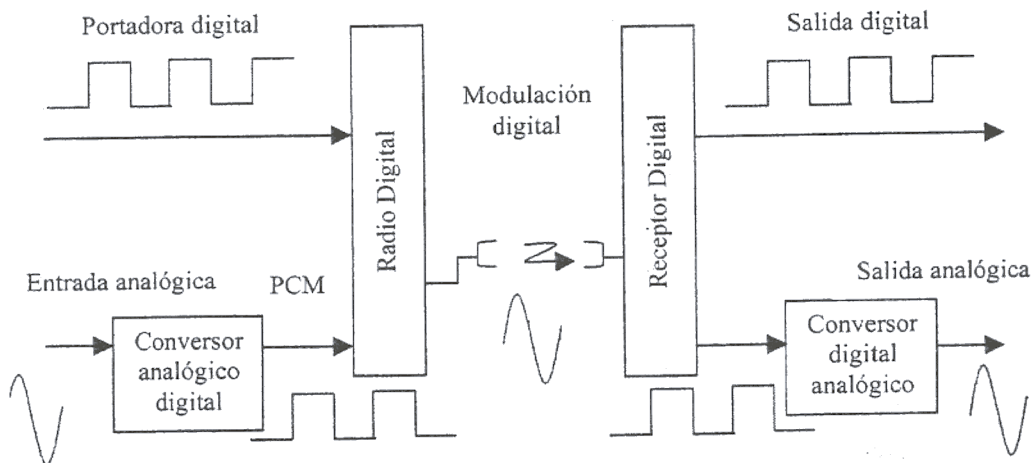
Es la modulación de una portadora senoidal por una señal digital. Es decir, lo que distingue esta modulación de la analógica, es que la modulante es una señal digital.

Se pueden distinguir dos tipos de situaciones en que se la utiliza:

1.-



2.-



De la misma manera que en la modulación analógica hay tres formas básicas de variar las características de la portadora (amplitud, frecuencia y fase) que son denominados como:

ASK (amplitude shift keying) o modulación por desplazamiento de amplitud.

FSK (frequency shift keying) o modulación por desplazamiento de frecuencia.

PSK (phase shift keying) o modulación por desplazamiento de fase.

QAM (quadrature amplitude modulation) o modulación de amplitud en cuadratura, es una combinación de ASK y PSK

Todas estas formas tienen variantes, dependiendo si se utiliza señalización binaria o señalización multinivel.

En sí misma la QAM es una señalización multinivel o una modulación multisimbólica.

En la señalización binaria, la señal portadora toma el valor 1 o el valor 0, dependiendo de la modificación efectuada. Como se ve, los bits se toman de a uno.

En la señalización multinivel o multisimbólica, en vez de tomar los bits de a uno, se los agrupa de a 2, de a 3, de a 4, etc. Entonces cada vez que se modifica la señal portadora se está enviando mayor cantidad de información (2, 3, o 4 bits, etc).

Como en la modulación analógica, interesa el ancho de banda y la relación señal / ruido en la recepción, pero también otros parámetros, por lo que se deben introducir algunos términos nuevos, que son la tasa de transferencia de información, la tasa de señalización, la eficiencia del ancho de banda y la probabilidad de error.

2.-Tasa de Transferencia de Información (Information transfer rate)

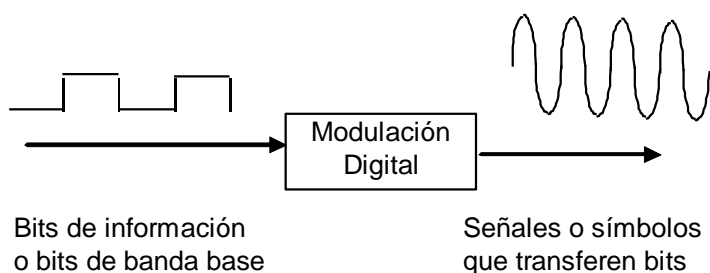
Se define como la **velocidad a la cual se transfiere la información binaria (bits)**, desde la fuente al modulador. **Se designa como R**, y su unidad es: bits / segundo

3.- Tasa de Señalización, o velocidad de transferencia de símbolos

La **tasa de señalización es la velocidad a la que cambia la señal portadora**. También se puede designar más simplemente como la tasa en baudios.

Baudio: Unidad de medida de velocidad de transmisión con que se mide un módem. Es el número de cambios de estado (voltaje o frecuencia) de una señal por segundo en una línea de comunicación, normalmente telefónica. Aunque el término baudio se utiliza como sinónimo de bits por segundo, en realidad, se trata de cosas diferentes, porque sólo a velocidades bajas, los baudios son iguales a los bits por segundo; por ejemplo, 300 baudios equivalen a 300 bps. Sin embargo, un baudio puede representar más que eso; por ejemplo, el módem V.22bis genera 1,200 bps a 600 baudios. La diferencia está en que cada cambio de estado en la señal no transmite necesariamente un bit, de forma que las dos medidas no son equivalentes.

El gráfico que sigue ayuda a ver la diferencia. **En la entrada del modulador interesa la Tasa de información, en su salida la Tasa de señalización.**



4.-Eficiencia del ancho de banda o eficacia espectral

Es la medida en que para una determinada forma de modulación, se utiliza el ancho de banda disponible.

Se expresa como

$$\eta = \text{bits/segundo/Hz}$$

$$\eta = R / \text{banda.ocupada}$$

$$2 \leq \eta \leq 8, \dots \text{cuando.mayor.mejor}$$

5.- Probabilidad de error P(e) y error de transferencia de bit (B E R)

Son conceptos parecidos pero no iguales, que se obtienen por distinta metodología, y por ello su diferencia.

La **probabilidad de error** es una expectativa teórica de obtener un determinado resultado en la recepción.

Si se afirma que la $P(e) = 10^{-5}$

Significa que en determinadas condiciones se puede tener un error de 1 bit cada 100.000 transmitidos.

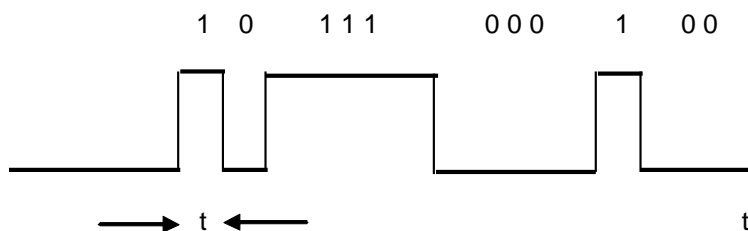
En cambio si se dice que el B.E.R. o el **Bit Error Rate** es de 10^{-5}

Significa que se ha medido un error de 1 bit en 100.000 transmitidos

Tanto la P(e) como el B.E.R. dependen del tipo de modulación y de la relación S/N en el canal

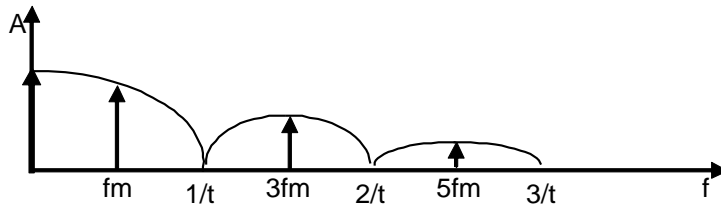
6.- Espectro y ancho de banda del tren de pulsos de la banda base.

Sea un tren de pulsos genérico como el siguiente



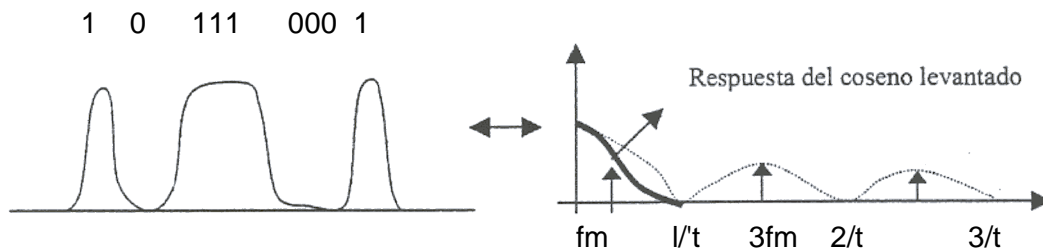
Para hallar el espectro habrá que considerar los espectros individuales de cada pulso, si lo que interesa es el ancho de banda, habrá que tomar el de mayor ancho de banda, es decir el de más corta duración o lo que es lo mismo cuando la sucesión de bits sea

de 1 y 0 alternados.



Para reducir el ancho de banda se utiliza en varios casos, antes de la modulación, un filtro pasabajos con respuesta de coseno levantado.

En este caso se reduce el ancho de banda y la forma de onda se redondea. Las componentes incluidas en el ancho de banda son la componente continua y la fundamental. La forma de onda del tren de pulsos es la indicada:

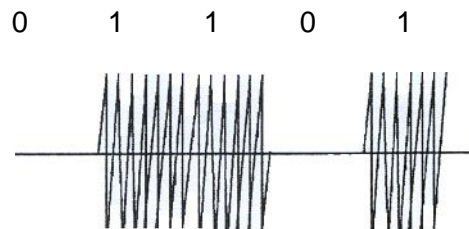


7.- ASK o modulación por desplazamiento de amplitud.

Es la forma más simple de modulación digital y en ella los bits son representados por diferentes amplitudes de una portadora de frecuencia fija.

En ASK binario, donde los dos estados son necesarios, la portadora es encendida o apagada

Este proceso es también llamado OOK (ON -OFF Keying)

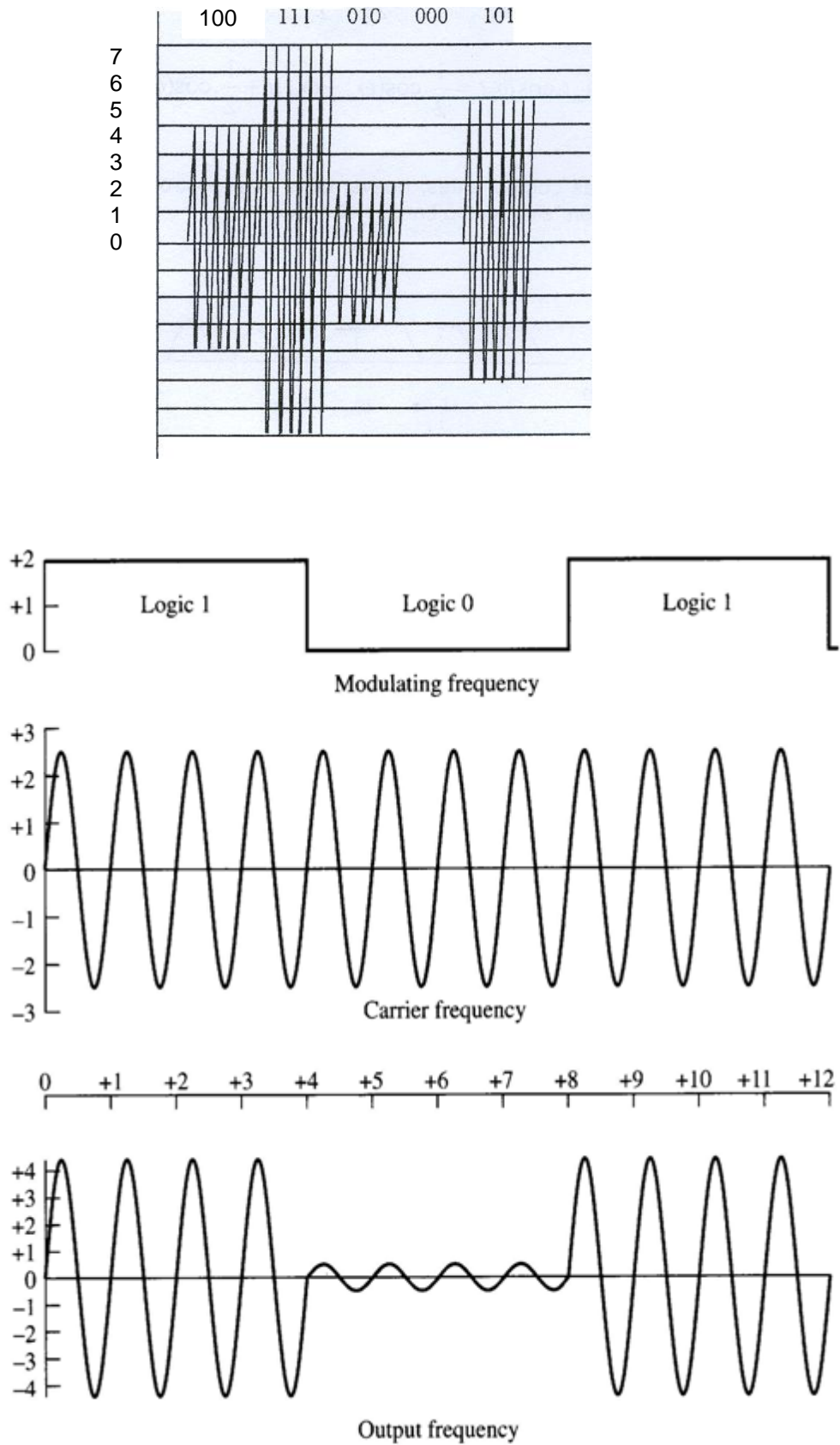


$$v_{am}(t) = A \cos(\omega_c t) \dots (1) \quad \text{para un 1 lógico}$$

$$v_{am}(t) = 0 \dots (2) \quad \text{para un 0 lógico}$$

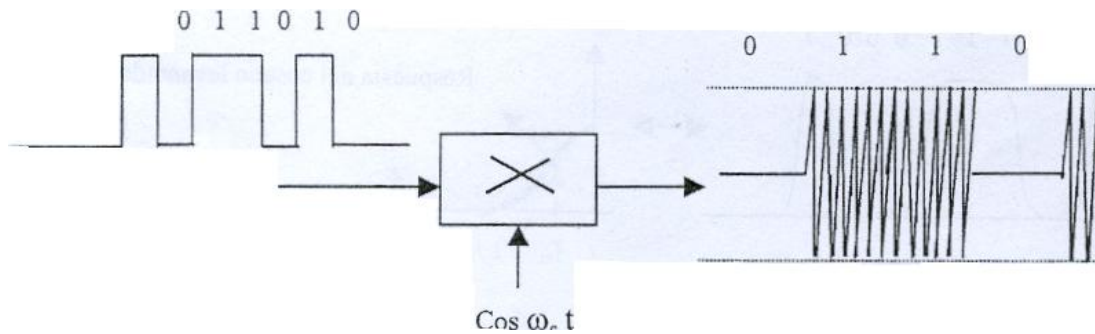
Para modular al 100 % se requiere que se cumplan las expresiones (1) ó (2), es decir la portadora se encuentra "encendida" o "apagada", y por tal motivo, a este tipo de modulación se le conoce también como modulación por manipulación de encendido o apagado, o todo o nada (OOK, de on-off keying).

Si se usa operación multinivel, por ejemplo tomando los bits de a tres, se tiene el **8 - ASK**, cuya forma de onda se muestra en la figura

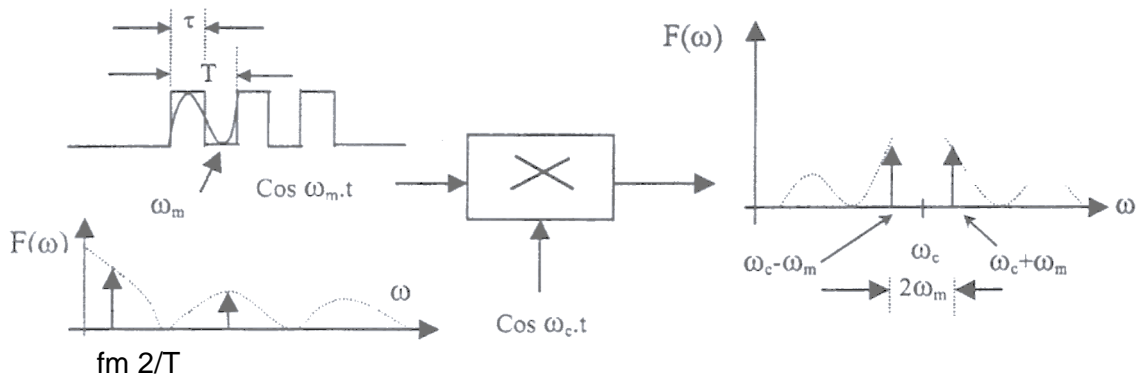


7a.- Generación, espectro y ancho de banda en ASK.

La generación de ASK se puede realizar utilizando un mezclador que multiplica el tren de banda base con una portadora senoidal, el circuito a utilizar como mezclador o multiplicador puede ser un modulador DBL (doble banda lateral)



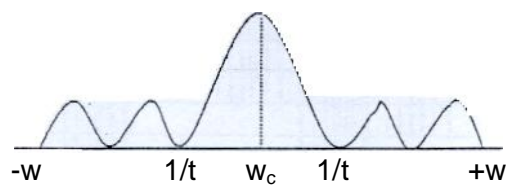
El ancho de banda mínimo se halla cuando la fundamental de la banda base tiene el mayor valor. Que ocurre cuando se tiene una sucesión alternada de ceros y unos. En ese caso:



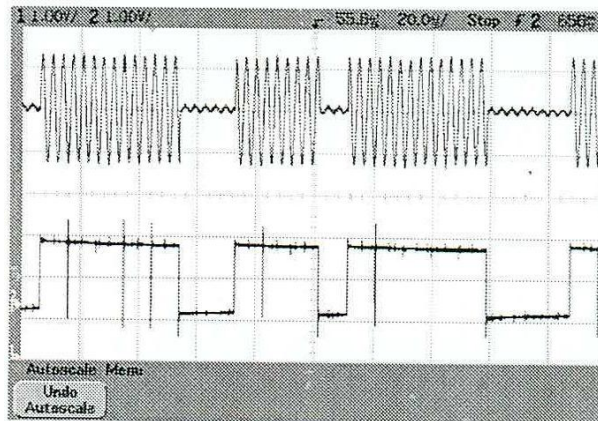
$$BW \text{ min} = 2fm = \frac{1}{\tau}, \text{ ya que } fm = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{T} \text{ y } \tau = \frac{T}{2}$$

$$\cos w_m t \cos w_c t = \frac{1}{2} \cos(w_c - w_m)t + \frac{1}{2} \cos(w_c + w_m)t$$

Si ahora incluimos todas las componentes, nuevamente el espectro será simétrico alrededor de la portadora, tendremos:

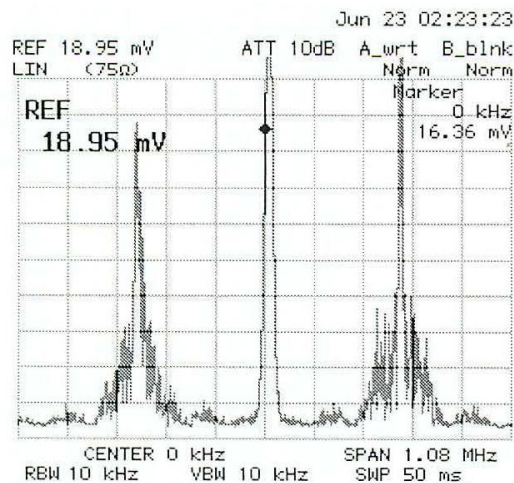


Modulación ASK, si utilizamos una señal moduladora con secuencia seudo aleatoria

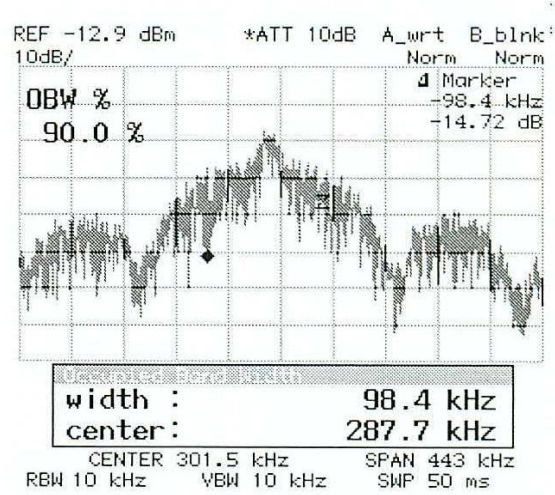


Se puede observar que cuando un bit presenta un valor elevado “1”, se obtiene la portadora mientras que cuando el nivel es bajo “0”, la salida es cero, como ya se había visto o sea que la secuencia seudo aleatoria de la señal moduladora, mantiene el mismo criterio en la salida

El espectro de la señal anterior visto en un Analizador de Espectro sería por ejemplo el siguiente con escala lineal



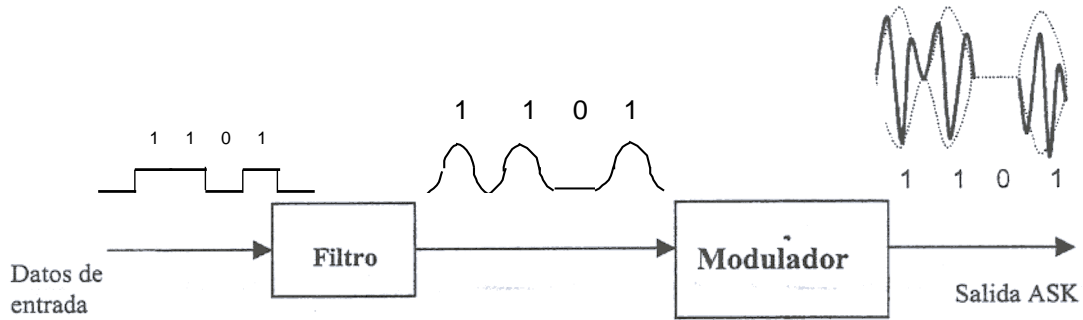
El espectro de la señal anterior visto en un Analizador de Espectro sería por ejemplo el siguiente con escala en decibeles



La eficiencia en la modulación ASK será:

$$\eta = \frac{1 \text{ bit}}{\text{segundo/hertz}}$$

Para disminuir el ancho de banda, previo a la modulación, se conforma al pulso con un pasabajos con respuesta de coseno levantado



La ecuación de la onda modulada resulta ser:

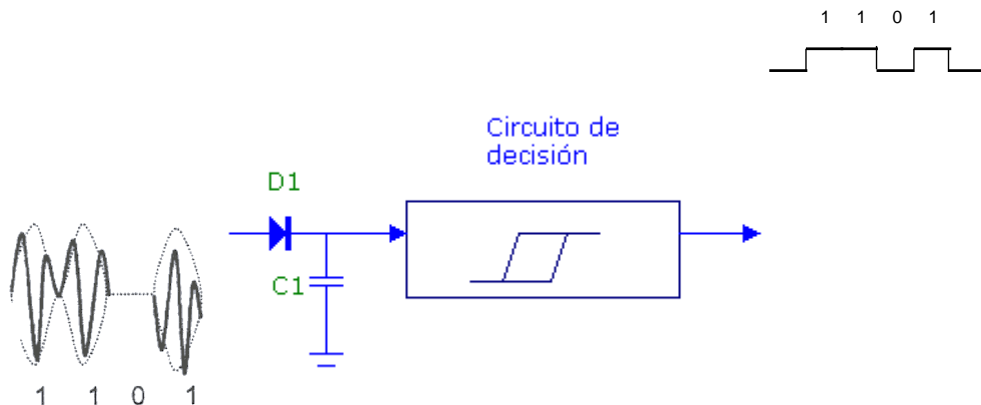
$$f_c(t) = A c f(t) \cos \omega c t \quad \text{con } f(t), \text{ variando entre 0 y 1}$$

El número que representa “R” (tasa de transferencia de información) y la velocidad de señalización (tasa de señalización) es el mismo.

Este tipo de modulación es muy poco utilizado por su poca inmunidad al ruido

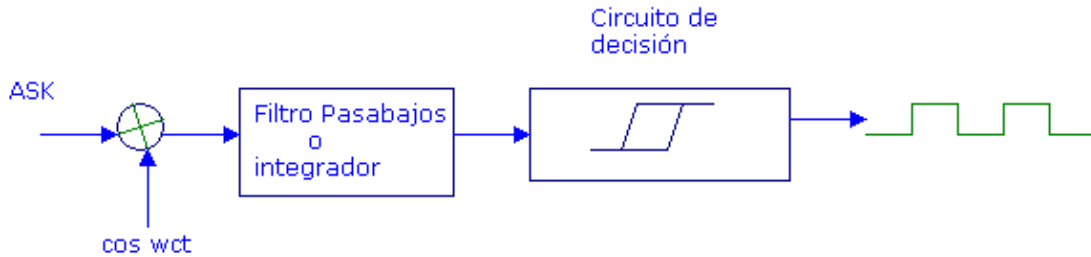
7b.- Detección de ASK

b1.- De envolvente



b2.- Coherente

Requiere de un circuito de corrección para evitar errores de frecuencia y fase propios de la detección coherente, pero tiene la ventaja de su mayor inmunidad al ruido.



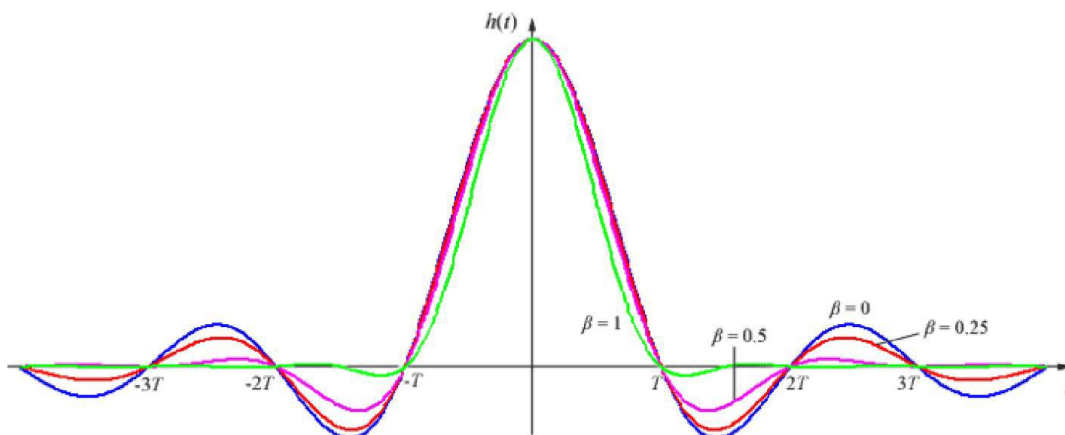
7c.- Aclaración respecto del ancho de banda y roll off

Filtros en sistemas de comunicación

En comunicaciones los filtros juegan un papel fundamental. Existen diversos tipos de filtros cuyas características son más o menos adecuadas para cada tipo de aplicación o función dentro de un sistema electrónico o de telecomunicaciones.

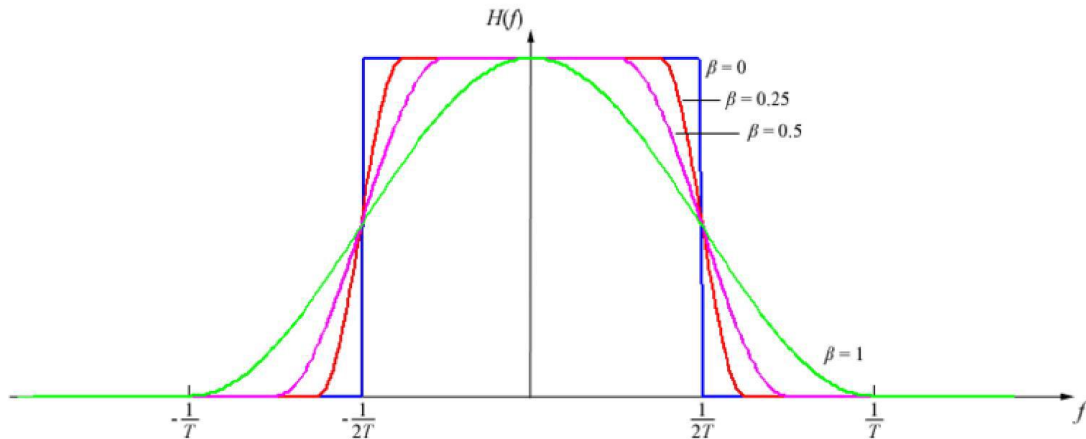
En los modernos sistemas de comunicación, dos de los filtros más comúnmente utilizados son los filtros en coseno alzado y el filtro Gaussiano.

El filtro en coseno alzado se caracteriza por no introducir ninguna interferencia entre símbolos. Se utiliza para conformar señales digitales y reducir así su enorme ancho de banda. Las siguientes figuras muestran la respuesta impulsiva y espectral. Se puede ver como el lóbulo principal de la respuesta impulsiva tiene una duración de $2 \cdot T$ segundos, en el que T es el periodo del símbolo que se desea transmitir (o, en general, filtrar). El factor se conoce como Roll-Off y permite variar el ancho de banda de paso del filtro (un valor común en la práctica se sitúa en torno a 0.3). La duración temporal (L) de la respuesta impulsiva comprende varios T (a mayor número de T , mayor precisión espectral). Observar que el filtro introduce un retardo de $L/2$ segundos.



$$h(t) = \text{sinc} \left(\frac{t}{T} \right) \frac{\cos \left(\frac{\pi \beta t}{T} \right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}}$$

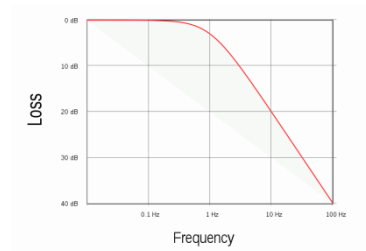
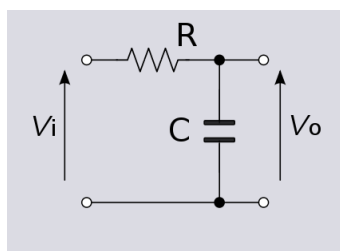
$$H(f) = \begin{cases} T, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi T}{\beta} \left[|f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$



La **Roll-off** es la inclinación de una función transferencia en función de la frecuencia, en particular en análisis de las redes, y más especialmente en conexión con los circuitos de filtrado en la transición entre una banda de paso y máxima frecuencia atenuada que deja pasar el mismo. Se aplica generalmente al término pérdidas de inserción de cualquier red, pero puede, en principio, aplicarse a cualquier función relevante de la frecuencia, y cualquier tecnología, no sólo la electrónica. Es habitual para medir el roll-off con una función logarítmica de frecuencia, por lo tanto, las unidades de roll-off son o decibeles por década (dB / década), en donde por cada década la frecuencia aumenta 10 veces, o decibeles por octava (dB/8ve), donde por cada octava la frecuencia aumenta 2 veces.

El concepto de roll-off se deriva del hecho de que en muchas redes de roll-off tienden hacia una pendiente constante a frecuencias bien lejos de corte de la red, o sea muy lejos del ancho de la limitación de ancho de banda de la misma. El roll-off permite dar una medida de rendimiento de una red tipo filtro, expresado a través de un número, que tiene en cuenta la respuesta en frecuencia total del filtro. Este concepto sirve todos los filtros pasa bajos, pasa altos o pasabanda

Lo expresado anteriormente por ejemplo para un filtro pasa bajos de primer orden sería,



Si determinamos la ganancia esta sería:

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Donde la pulsación de corte será calculada como $\omega_c = 1/RC = 1$ o sea cuando la amplificación del sistema cae a $1/\sqrt{2}$ de la máxima que sería "1"

$$|A|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

Expresándolo en dB, tendríamos:

$$|A|^2 (dB) = 10 \log \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

Si lo expresamos como **pérdidas** sería:

$$L (dB) = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 \right]$$

Si aplicamos el valor de la pulsación de corte " $\omega_c = 1$ " tendremos:

$$L (dB) = 10 \log [1 + (\omega)^2]$$

$$L (dB) = 20 \log \omega$$

Entonces si consideramos un intervalo de frecuencias, el coeficiente de **roll off** estará dado por:

$$\Delta L (dB) = 20 \log \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \text{ dB / intervalo}_{2,1}$$

Expresándolo en décadas

$$\Delta L (dB) = 20 \log(10) = 20 \text{ dB/década}$$

Expresándolo en octavas

$$\Delta L (dB) = 20 \log(2) = 6 \text{ dB/octava}$$

Con lo dicho anteriormente si consideramos el efecto de **roll off de un filtro** siempre existente al conectar los equipos de telecomunicaciones, tendremos:

$$\mathbf{Bw = R/n (1 + \phi)}$$

Donde ϕ es el coeficiente de **roll off**

Donde **R** es la **tasa de información**

Donde **n** es la cantidad de **bits** con que transmitimos la información

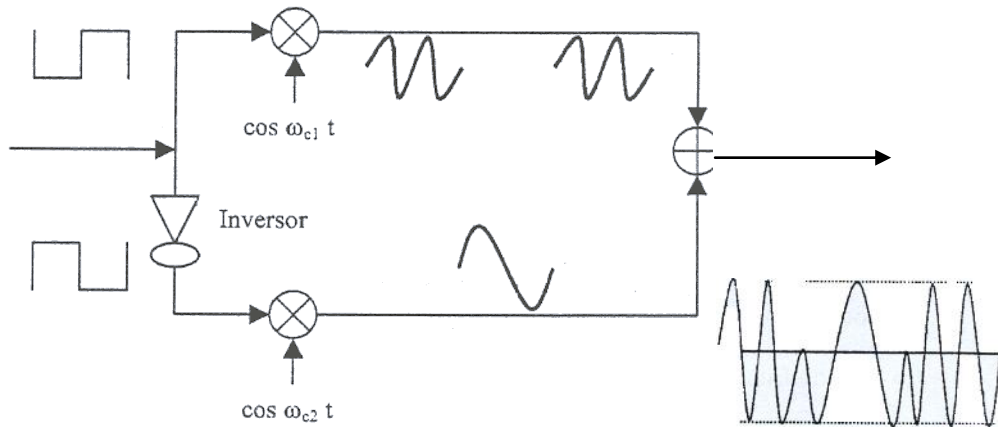
Entonces para el caso de ASK, si suponemos que $\phi = 0$, como $n = 1$, entonces, **Bw = R = 2fm**

O sea la tasa de información es igual a la tasa de señalización.

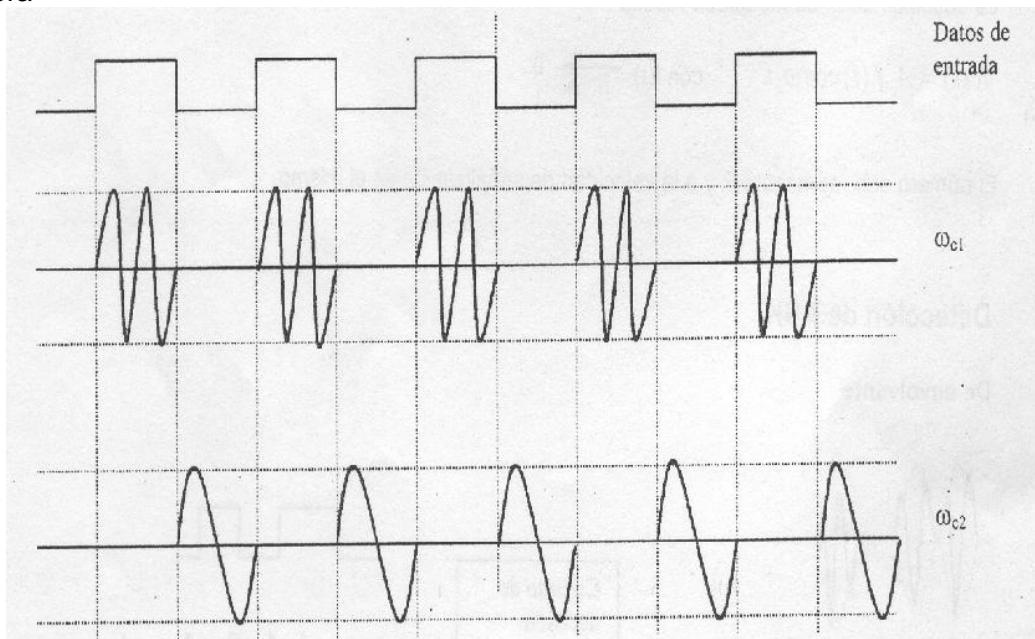
8.-FSK o modulación por desplazamiento de frecuencia.

8a.- Generación de FSK

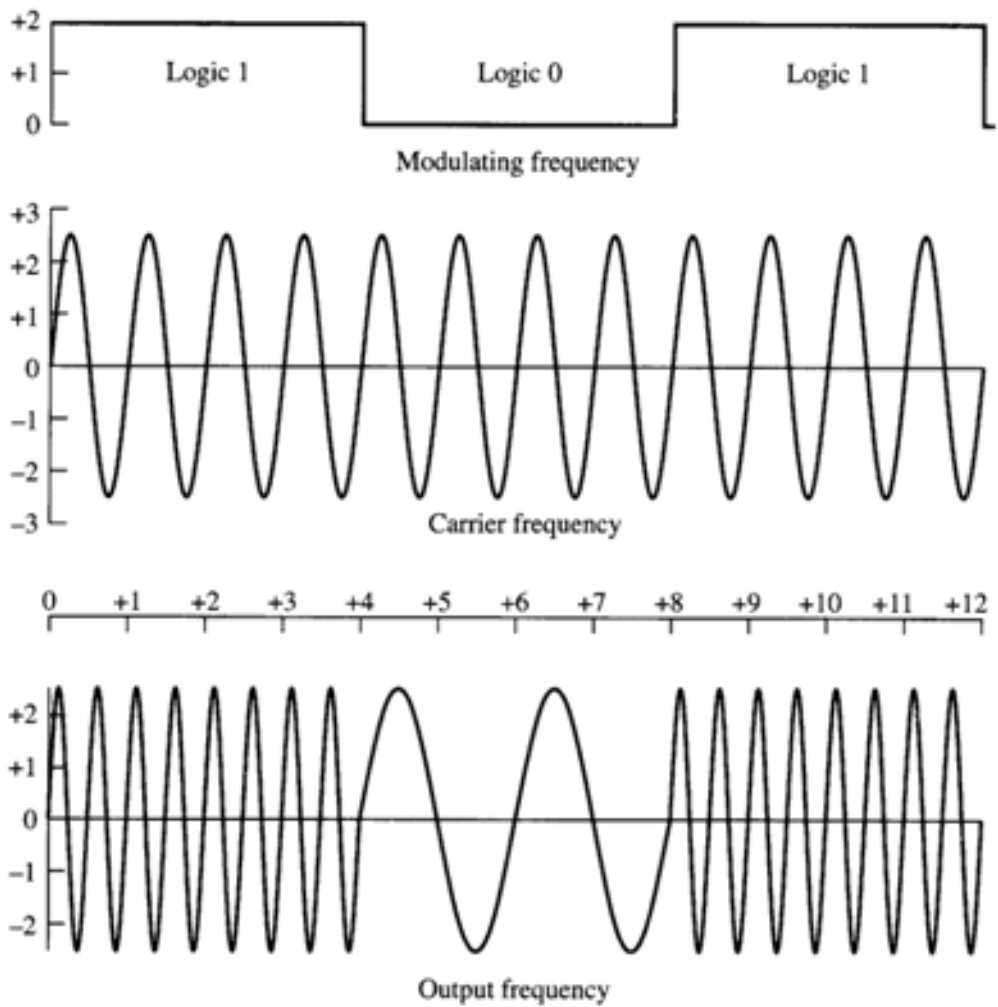
Para generarlo se puede recurrir al siguiente esquema:



Básicamente, cada cambio en el tren de pulsos provoca un cambio en la frecuencia portadora

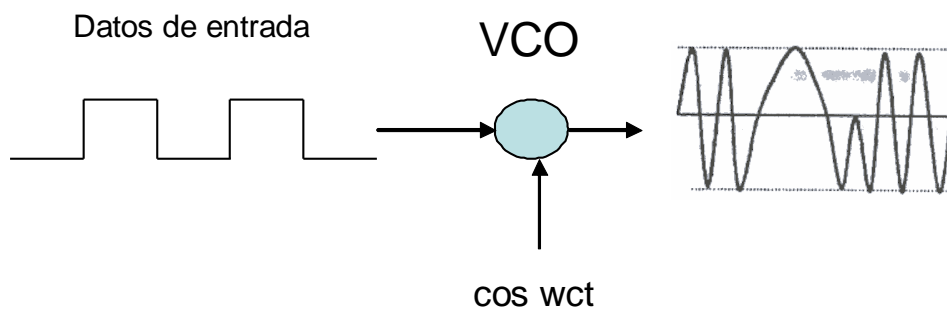


Como se ve, básicamente son dos generadores de ASK cuya salida se suman.

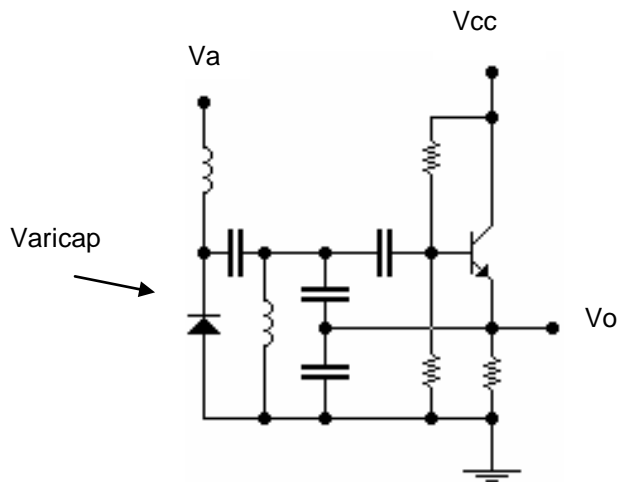


Este tipo de circuito produce transiciones bruscas en el cambio de frecuencia, que aumentan el ancho de banda.

Una solución alternativa es utilizar en la entrada un VCO que permite una transición más suave, dando lugar al llamado **CPFSK (Continuos Phase Shift Keying)**



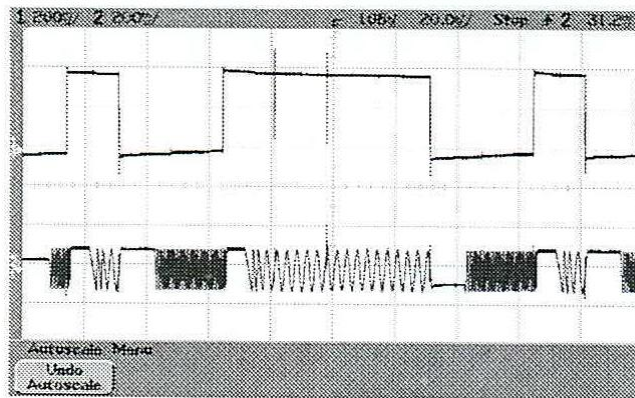
Ejemplo de VCO, en este caso un oscilador colpitt, con varicap



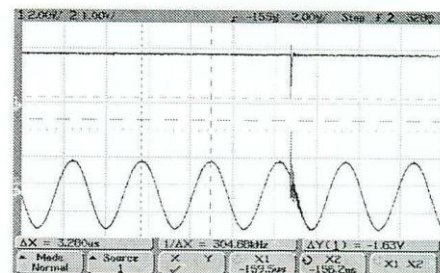
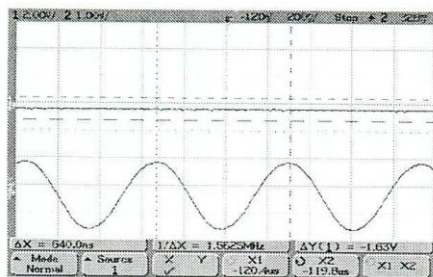
La modulación FSK se caracteriza como: $f_c(t) = A_c \cos((\omega_c + f(t)\Delta\omega)t)$

o sea que la portadora cambia entre $\omega_c \pm \Delta\omega$, ya que $f(t)$ es una señal que toma los valores de +1 o -1, a una velocidad igual a R (bits/seg)

Modulación FSK con secuencia de bits pseudo aleatorio

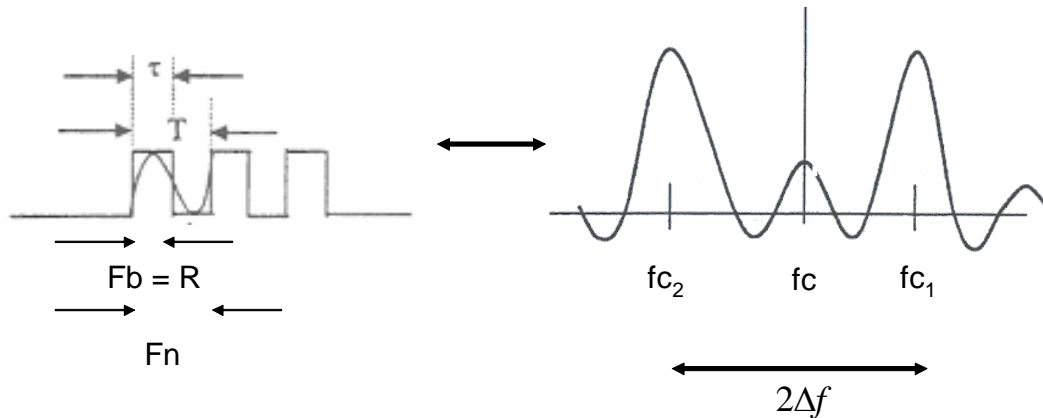


Supongamos que las las señales FSK que se muestran son las correspondientes al "0" lógico y "1" lógico respectivamente



8b.- Ancho de banda en FSK

El cambio más rápido en la moduladora ocurre cuando hay una sucesión de ceros y unos alternados en la banda base. Si razonamos en términos de la fundamental obtenemos:



Como se ve en el espectro hay dos señales alrededor de una portadora "virtual". Para hallar el ancho de banda se seguirá un tratamiento similar al de la FM analógica, es decir en función del " β "

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$$

El tiempo en un *bit* = $\frac{1}{\tau_s}$

$$fb = \text{tasa.en.bits} = \frac{1}{\tau} = R$$

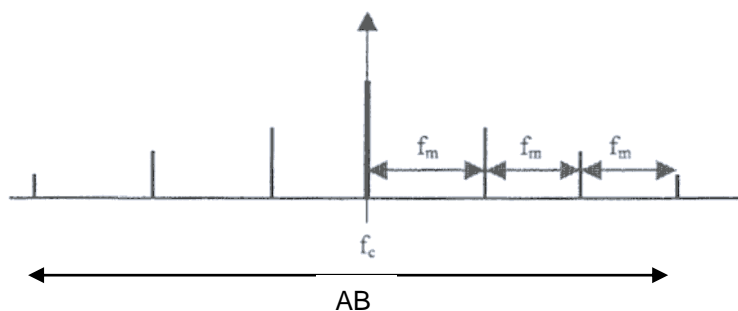
$fc_2 = \text{frecuencia.de.marca}$

$fc_1 = \text{frecuencia.de.espacio}$

$$f_m = \text{frecuencia.fundamental} = \frac{1}{2} fb$$

$$\beta = \frac{\frac{fc_2 - fc_1}{2}}{\frac{1}{2} fb} = \frac{fc_2 - fc_1}{fb}$$

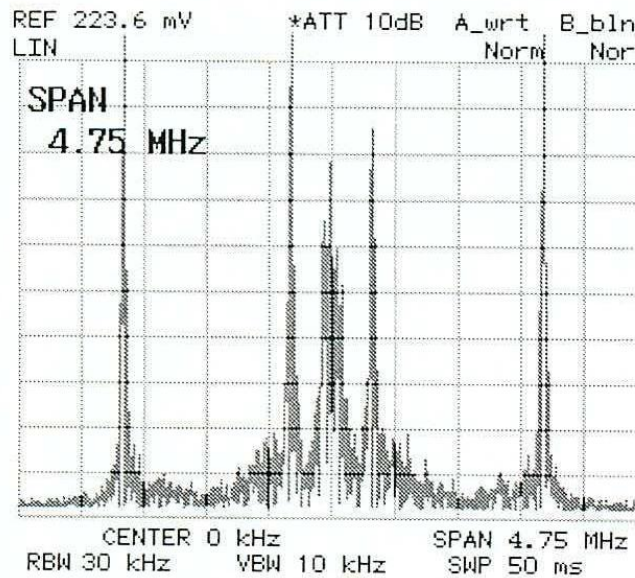
El valor de $\beta \approx 1$ en emisiones radioeléctricas, entonces:



$$Bw = R/n (1 + \phi) , \text{ donde } n=1 \text{ y } \phi=0$$

En el FSK binario, el R y la velocidad de señalización están expresados por el mismo número

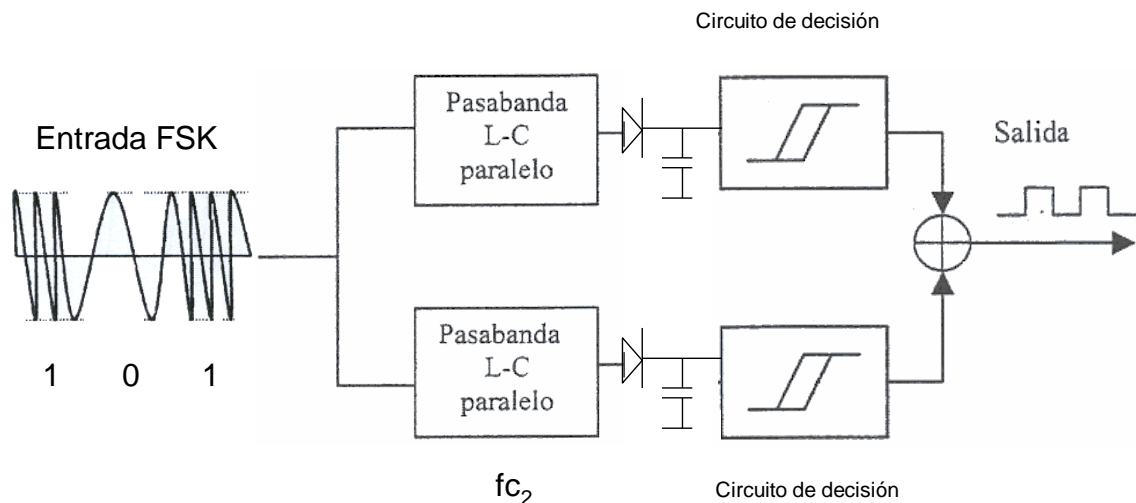
Espectro de la señal FSK que mostraría un Analizador de Espectro (en forma lineal) o sea de doble banda lateral con portadora suprimida



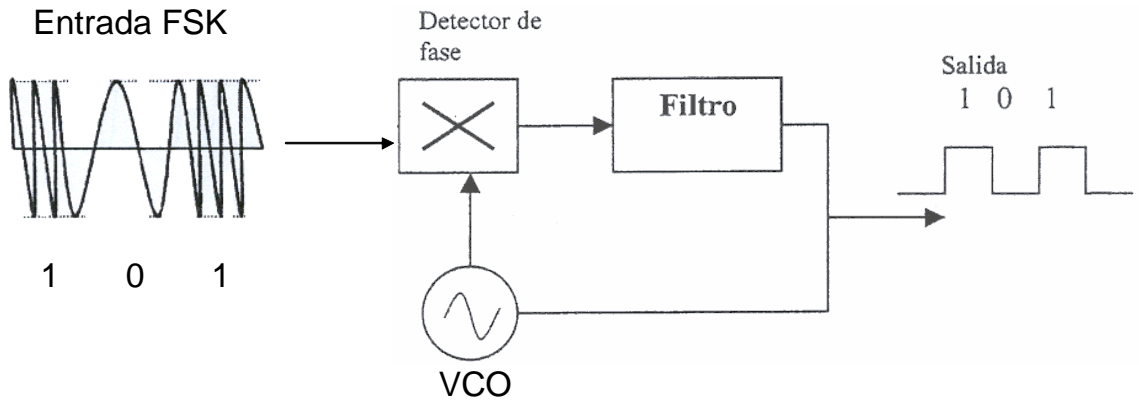
8c.- Detección de FSK

c1.-No coherente

En este caso la señal FSK binaria es previamente filtrada en dos pasabandas y luego detectada de la misma manera que en ASK.



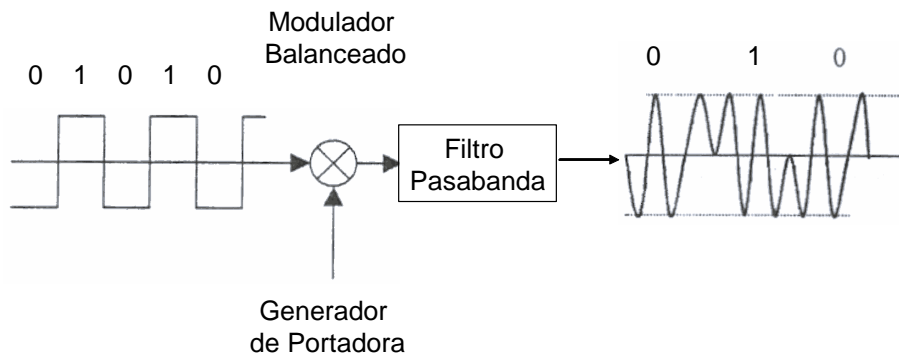
c2.-No coherente con PLL



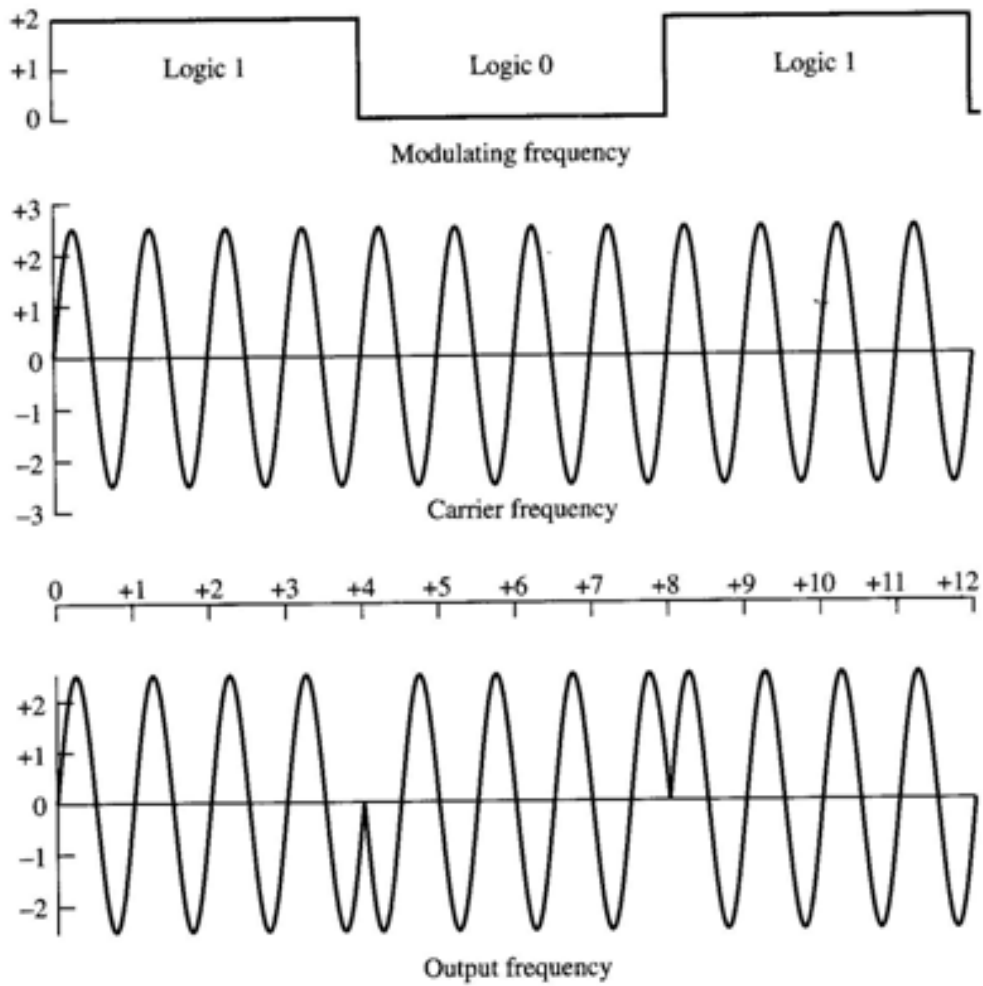
9.- PSK o Modulación por desplazamiento de fase.

9a.- Generación de PSK

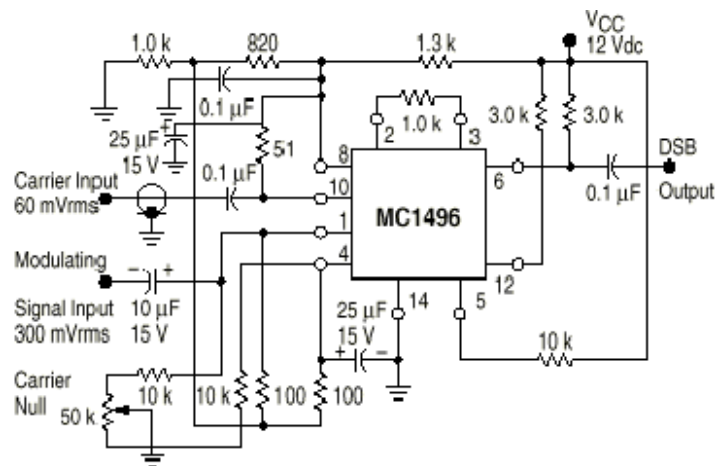
En este caso se varía la fase de la portadora de acuerdo al tren de pulsos de entrada, que conviene que sea una señal bipolar.



Este ejemplo corresponde a una señal 2PSK o BPSK



Ejemplo de Modulador balanceado con integrado

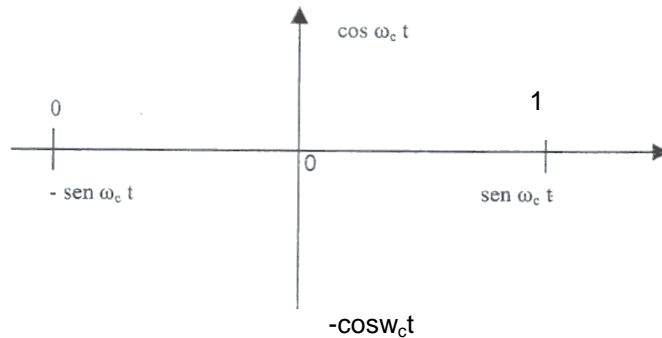


La ecuación de la señal modulada es:

$$f_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + D p f(t)) \text{ con } f(t) \text{ entre } +1 \text{ y } -1$$

La fase de la portadora puede asumir dos valores: 0° y 180° y ello queda representado en el diagrama de constelaciones, que resulta de utilidad para representar las distintas variantes de PSK.

El caso que está representado es también llamado BPSK (bi-phase PSK) o PSK bifase

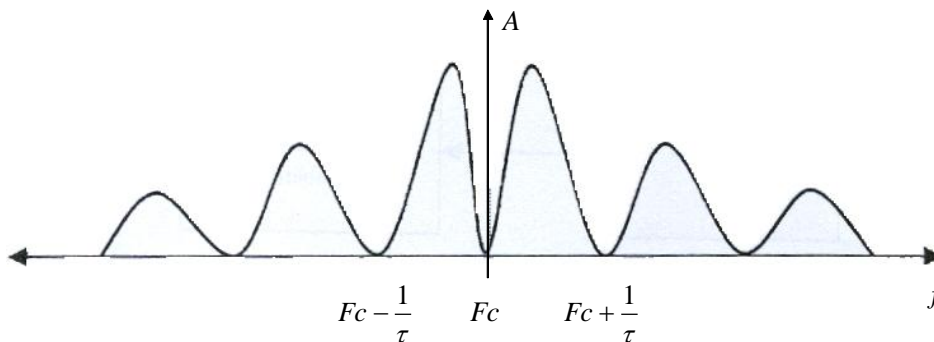


9b.- Espectro y ancho de banda de la señal PSK.

El ancho de banda de la BPSK es idéntico al ASK, ya que esta manera de modulación puede verse como una ASK con portadoras de la misma frecuencia pero con amplitudes A_c y $-A_c$.

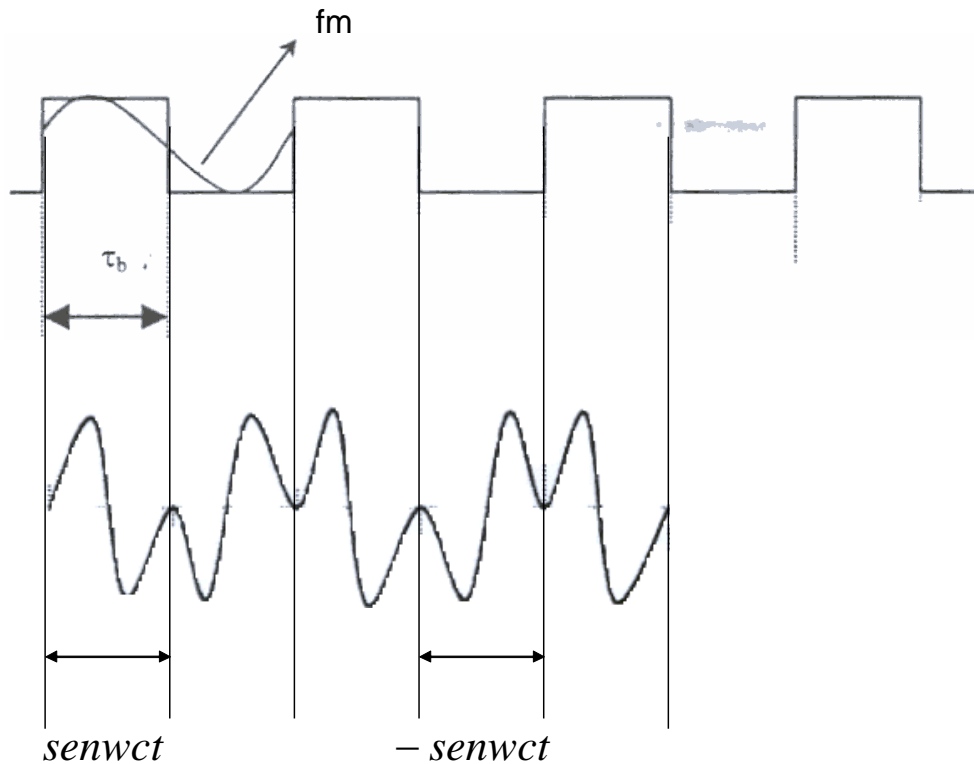
Si los cambios de fase son abruptos, el ancho de banda será grande y para reducirlo se hace necesario, la conformación de la señal moduladora.

Espectro de una señal BPSK



Cada vez que cambia la lógica de entrada, cambia la salida, luego R y la tasa de señalización (baudios) están expresados por el mismo número.

En términos de la fundamental, el ancho de banda más amplio ocurre cuando los datos binarios son una sucesión de unos y ceros.



$$Salida = senw_m t . x . senw_c t = \frac{1}{2} \cos(wc - wm)t - \frac{1}{2} \cos(wc + wm)t$$

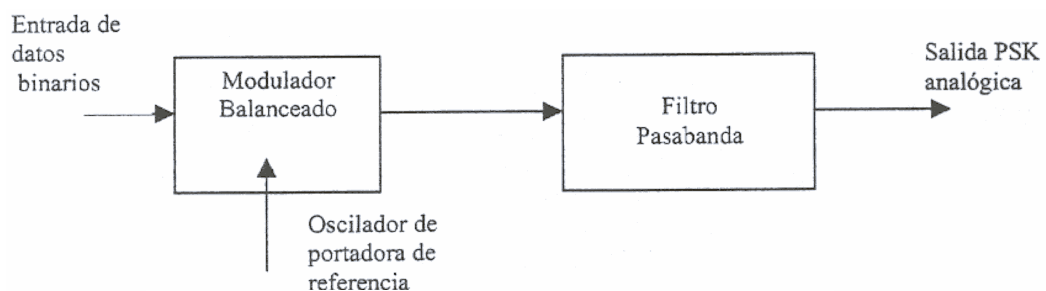
Donde:

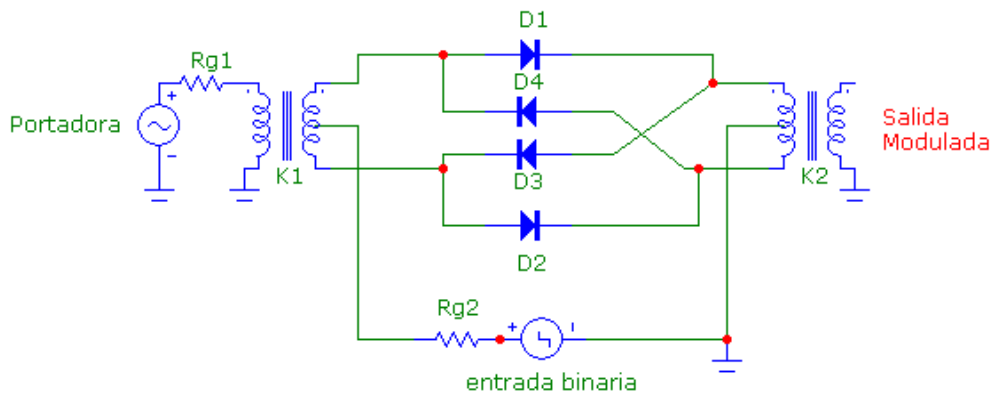
w_m = pulsación fundamental del tren binario

w_c = pulsación de portadora No modulada

$$Bw = 2fm = R$$

9c.- Generación de BPSK





La entrada binaria, debe tener un valor de amplitud mayor que la portadora, de forma tal que controle el encendido y apagado de los diodos.

Si hay un 1;

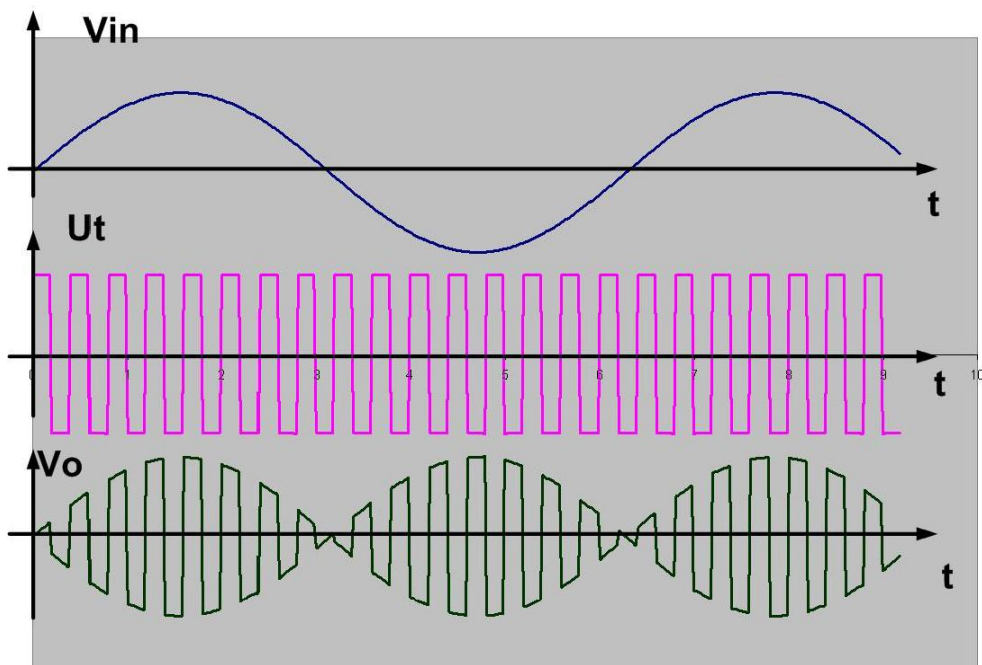
D1 y D2 conducen
D3 y D4 no conducen

Por lo tanto, la señal modulada en la salida tendrá la misma fase que la portadora.

Si hay un 0;

D1 y D2 no conducen
D3 y D4 conducen

Por lo tanto, la señal modulada en la salida aparece en contrafase respecto de la portadora



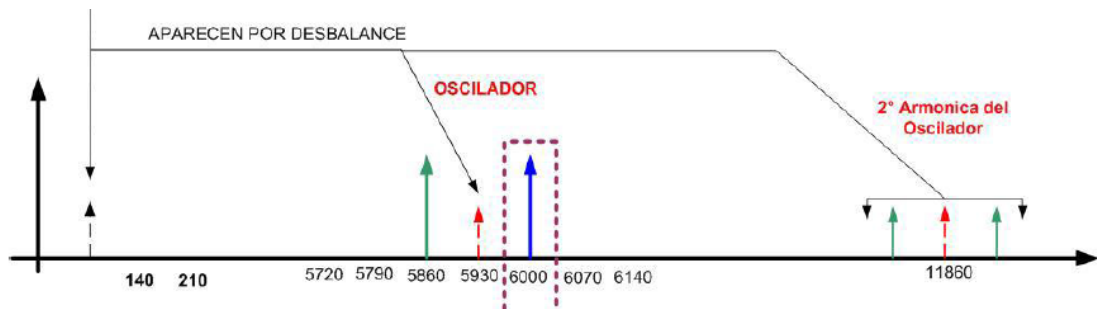
Espectro del Modulador en anillo Doble Balanceado

$$U(t) = 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{\text{sen}(n \frac{\pi}{2})}{n \frac{\pi}{2}} \cdot \cos(n \omega_0 t)$$

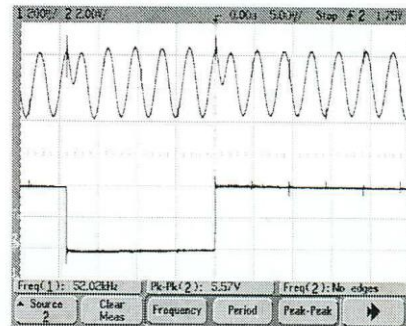
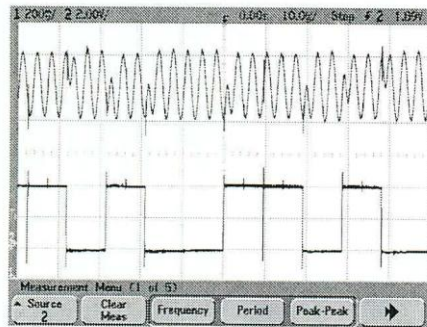
CONVOLUCIÓN

$$fo(t) = S(t) \cdot U(t)$$

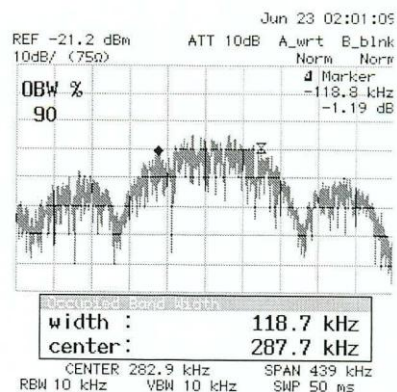
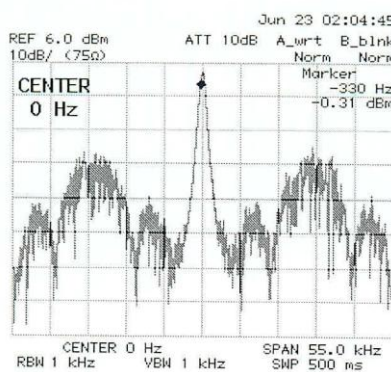
$$Fo(\omega) = S(\omega) * U(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(\omega) \cdot S(\omega - x) \cdot dx$$



Ejemplos de Modulación BPSK, con secuencia de bits aleatorios

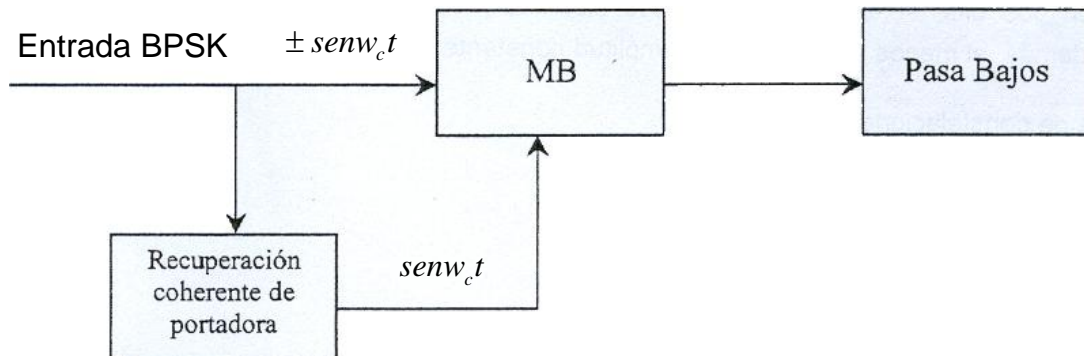


El espectro de la señal anterior visto en un Analizador de Espectro sería por ejemplo el siguiente con escala lineal y en decibeles respectivamente



9d.- Detección BPSK

No es admisible la detección no coherente y se hace necesario un circuito de recuperación de la portadora para evitar error de frecuencia y fase.



Suponiendo que se ha recuperado la portadora. la salida será:

$$Salida = senw_c t \cdot x \cdot senw_c t = sen^2 w_c t = \frac{1}{2} (1 - \cos 2w_c t)$$

"1" lógico

$$Salida = -senw_c t \cdot x \cdot senw_c t = -sen^2 w_c t = -\frac{1}{2} (1 - \cos 2w_c t)$$

"0" lógico

d1.-Bucle elevador al cuadrado

Una forma de hacer el recuperador coherente de portadora es utilizando un, **Bucle elevador al cuadrado**

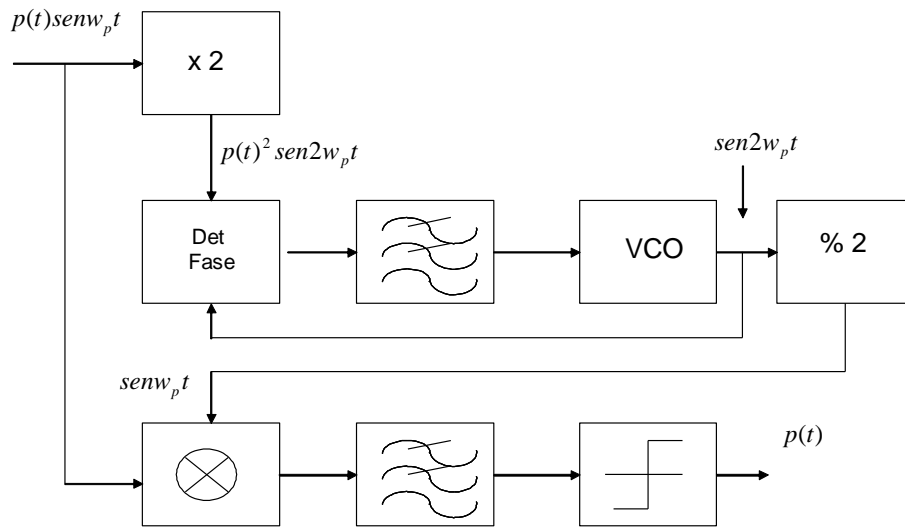
La **demodulación de una señal PSK** puede realizarse empleando un **detector coherente**. Para recuperar la señal portadora generalmente se necesita extraer la modulación.

En el caso de una señal PSK binaria (**BPSK**), esto se puede conseguir duplicando la frecuencia de la señal de entrada, al igual que en DBL.

Como las variaciones de la fase de la señal de entrada son de 0 grados o de 180 grados, al duplicar la frecuencia se obtienen variaciones de 0 o de 360, esto es, se elimina la modulación de fase. Con un PLL convencional se recupera la frecuencia doble de la portadora **2 fp**, obteniéndose fp por medio de un divisor por dos. El resto del proceso es el propio de un detector coherente, recuperándose la señal moduladora con ayuda de un comparador.

El duplicador genera muchos armónicos pero el PLL los elimina fácilmente. En este proceso de recuperación de la portadora se origina una indeterminación de fase, ya que al elevar al cuadrado, o al duplicar la frecuencia, se ha duplicado asimismo la fase

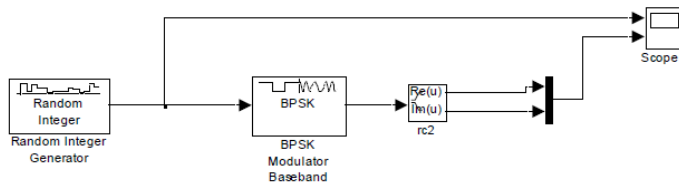
convirtiendo los 180° correspondientes a un estado en 360°, que no se distingue de los 0° correspondientes al otro estado. Esta ambigüedad puede evidenciarse asimismo considerando que los valores asociados a 1 y -1 que puede tomar $p(t)$ dan idéntico resultado al ser elevados al cuadrado $p^2(t) = (-p(t))^2$



Hay otros tipos de recuperador de portadora, el **bucle de costas** o **en cuadratura**

Simulación de la modulación BPSK con SIMULINK

EJERCICIO: Construir el siguiente modelo:

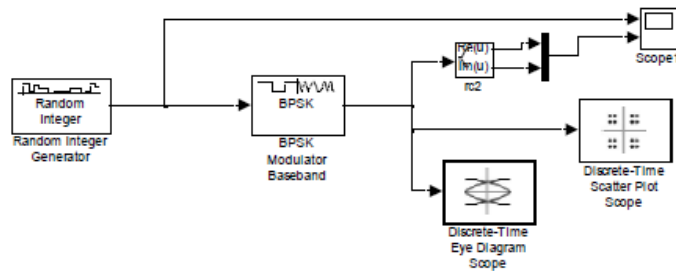


Random Integer: Communications Blockset -> Comm Sources
 BPSK Modulator: Communications Blockset -> Modulation -> Digital
 Complex a Re+Im : Simulink -> Math Operations
 Multiplex: Simulink -> Signal routing
 Scope Simulink -> Sinks

El generador debe producir un alfabeto de dos valores (2-ary). Utilizar un $T_s=1E-3$. En el modulador se puede variar la fase.

Comprobar las señales mostradas en el osciloscopio (como se puede observar, estas señales son digitales, concretamente de +1 y -1, y no símbolos sinusoidales: a esto se llama **modulación en banda base**, en la que se emplea un modelo equivalente sin modular realmente; más adelante se verá como modificar esto).

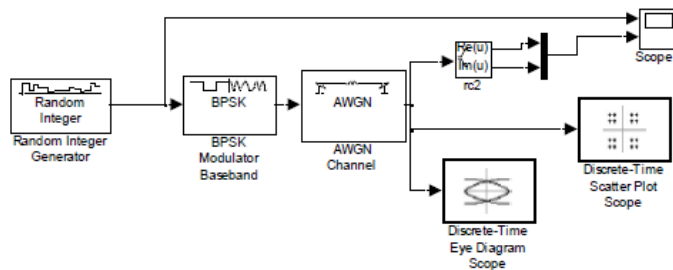
EJERCICIO: Añadir dos medidores más: constelación (scatter plot) y diagrama de ojo. (Ambos en Communications Blockset -> Comm Sources). Visualizar todos los resultados.



EJERCICIO: Añadir perturbación por canal ruidoso AWGN. (En Communications Blockset -> Channels). Y repetir las medidas.

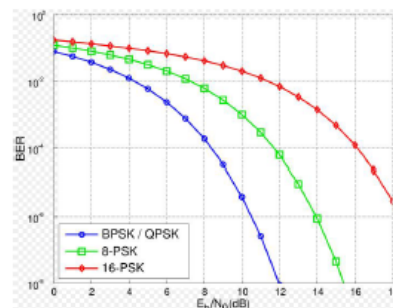
El ruido blanco Gaussiano (AWGN) simula el ruido captado por el receptor así como el propio ruido interno generado por los bloques de dicho receptor (calculado a partir de las figuras de ruido de cada bloque y la fórmula de Friis para ruido). AWGN es tal que su media es nula y su espectro (N_0) es continuo para toda la banda de frecuencias. Los sistemas digitales miden la relación entre señal y ruido mediante el cociente E_s/N_0 ó E_b/N_0 , en donde E_s es la energía por símbolo, E_b es la energía por bit y N_0 (*Watts/Hz*) es la densidad espectral de potencia de ruido. Normalmente se trabaja con decibelios: E_s/N_0 (dB) = $10 \log(E_s/N_0)$.

El bloque AWGN tiene como parámetros la potencia de la señal de entrada, la relación E_s/N_0 deseada y el período de símbolo. Prestar atención a su correcta configuración.



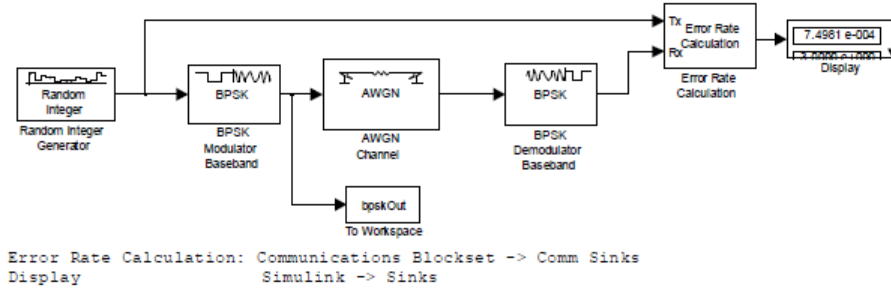
Uno de los parámetros fundamentales de los diferentes tipos de modulación es la tasa de error, BER (Bit Error Rate). Normalmente BER se da en función de la calidad de señal recibida, es decir, en función del ratio E_b/N_0 . Para BPSK se demuestra que esa tasa de error es:

$BER = 1/2 * erfc(\sqrt{E_b/N_0})$, en donde *erfc* es la función de error complementaria. En la figura siguiente se puede ver gráficamente el BER para diferentes modulaciones.



EJERCICIO: Veamos la probabilidad de error de bit con el siguiente modelo. Construir el modelo y variando E_b/N_0 del bloque AWGN, obtener y representar la curva $BER=f(E_b/N_0 \text{ (dB)})$. Comprobar la potencia de la señal de salida del modulador.

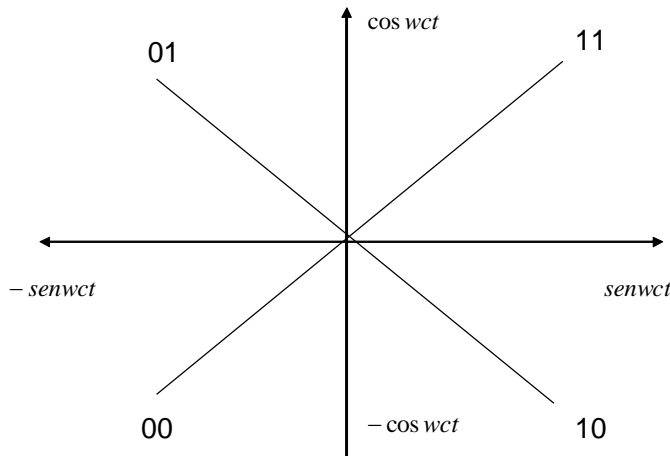
En el modelo de la figura se ha enviado la señal BPSK al workspace para comprobar que su potencia media es de 1 W. Se puede observar en el display $BER(7 \text{ dB})=7.49E-4$, si se calcula $BER=1/2 * \text{erfc}(\sqrt{10^{0.7}}) = 7.7267e-004$ (obviamente siempre habrá un pequeño error con el valor teórico).



9e.- QPSK o modulación por desplazamiento de fase cuaternaria

En este sistema, en la entrada los bits se transmiten de a dos, en “dibits”. Y lo que se pretende es producir un cambio en la salida cada dos bits. Como se pueden formar cuatro combinaciones distintas con dos bits, se tienen cuatro fases distintas para la misma frecuencia portadora, que mantiene además, al menos idealmente, su amplitud constante.

El diagrama de constelaciones es el siguiente:

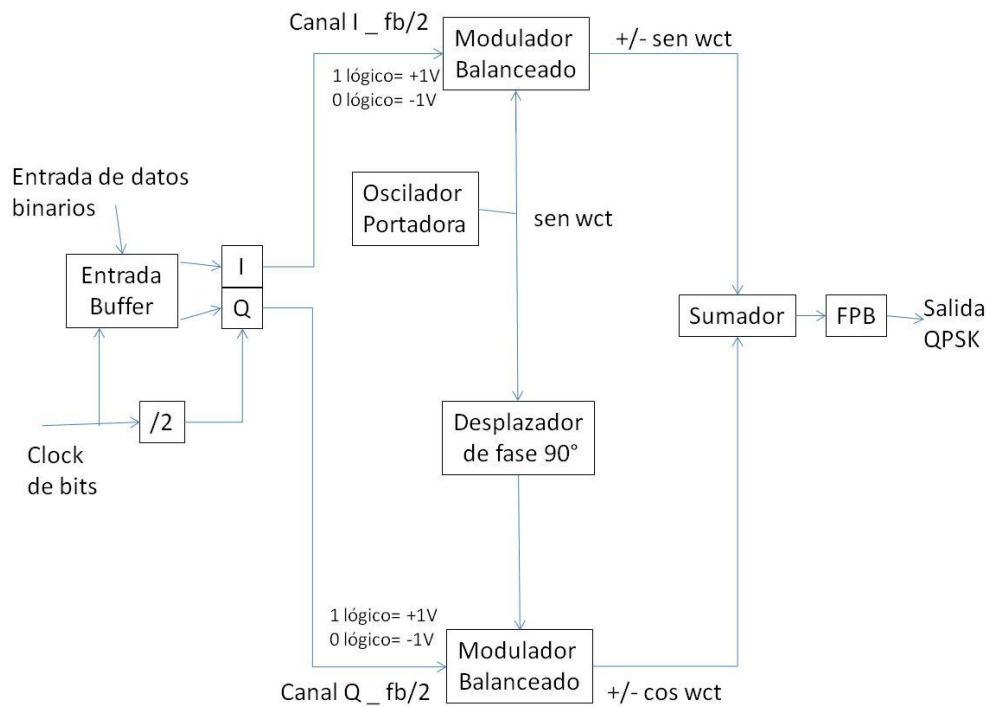


Entrada Binaria	Fase de salida
01	+135
00	-135
10	-45
11	+45

Si expresamos analíticamente las fases tenemos:

- 11: $+senwct + coswct$
- 01: $-senwct + coswct$
- 00: $-senwct - coswct$
- 10: $+senwct - coswct$

e1.- Generación de QPSK



Los datos de entrada son agrupados en **dibits** en el buffer, al que llegan en forma serial para salir simultáneamente en paralelo. El bit "I" modula una portadora que está en fase con el oscilador de referencia y el bit "Q" la otra que está en cuadratura.

Puede verse que una vez que un bit ha sido derivado a los canales "I y Q" la operación es idéntica a un modulador BPSK. Cuando el sumador combina las dos señales en cuadratura se producen las expresiones analíticas indicadas previamente

e2.-Ancho de Banda en QPSK

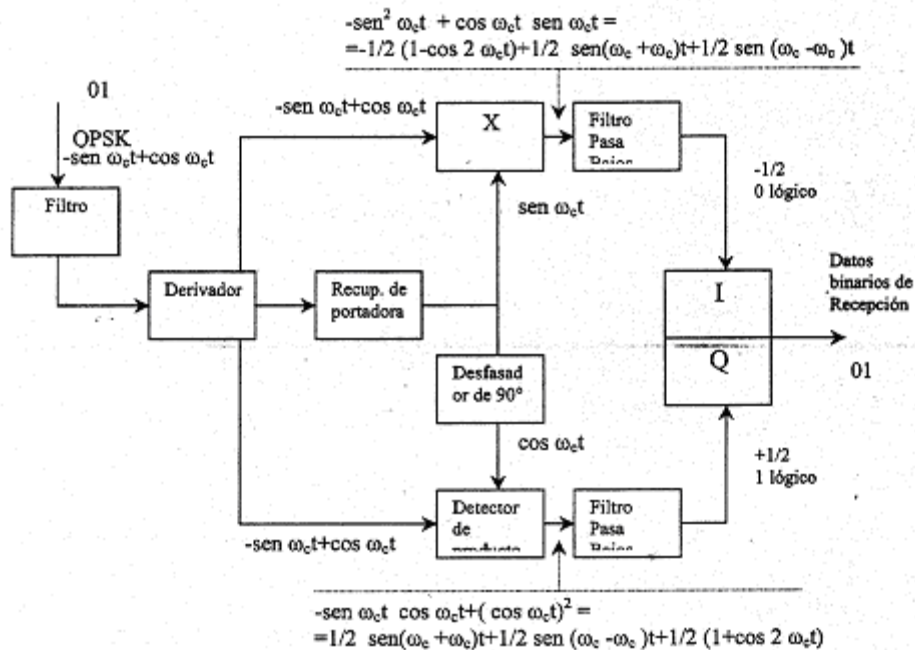
Como para el código dibit ocurre un solo cambio en la salida cada 2 bits, la tasa de baudios es la mitad de la tasa de bits.

El ancho de banda, para la misma cantidad de bits, resulta también la mitad de BPSK.

$$Bw = R/n (1 + \phi)$$

Considerar que $M=2^n$, entonces como $M=4$, por lo tanto, $n=2$, si $\phi=0$; $Bw=R/2$, la mitad del BPSK

e3.-Detección QPSK



Para visualizar el funcionamiento del detector de QPSK supongamos estar recibiendo la señal

$$01 \Rightarrow -\text{sen} \omega_c t + \cos \omega_c t = \sqrt{2} \text{sen}(\omega_c t + 135^\circ)$$

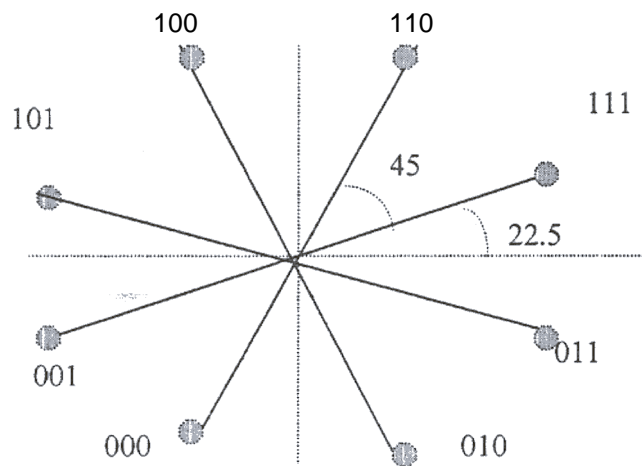
El derivador envía la señal a los canales "I" y "Q" y al circuito de recuperación de portadora, donde se generan las portadoras de referencia de ambos detectores de producto. Los resultados son los indicados y luego de filtrado en el pasabajos se tiene una combinación de "I" y "Q" lógicos.

El circuito de recuperación de portadora es del mismo tipo que el visto anteriormente.

e4.- 8PSK

En este caso, se toman los bits de a tres, formando un "tribits".

Las fases están diferenciadas en 45°. Se muestra el diagrama de constelación, siempre se forma un círculo.



Diagramas de bloques del generador y el receptor pueden verse en el libro de Tomasi: Sistemas de Comunicaciones Electrónicas.

Como se ve en el diagrama de constelaciones. ocurre un cambio de fase cada 3 bits, por lo cual, la tasa de baudios, o velocidad de Señalización es 1/3 de la tasa de bits. Lo mismo ocurre con el ancho de banda.

e5.-16PSK

Los bits se toman de a cuatro “cuadribits”. La separación entre fases es de 22,5°. La tasa de baudios y el ancho de banda son de 1/4 de la tasa de bits. El diagrama de constelación y circuitos bloques del transmisor y receptor pueden verse en el libro de Tomasi ya citado.

9f.-DBPSK –Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria Diferencial

Esta técnica se utiliza para evitar proveer portadora sincrónica en el receptor y demodular la señal mediante un circuito cuadrador o recuperador de la portadora.

f1.-Generador DBPSK

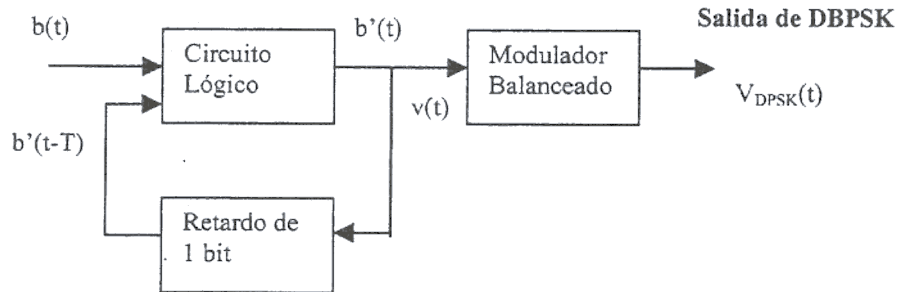
Se incorpora delante del modulador BPSK un circuito lógico (básicamente una compuerta XNOR) cuya salida es realimentada y retardada el tiempo de 1 bit, de forma tal que un bit entrante es comparado con el bit anterior por la compuerta XNOR.

Para el primer bit de datos, el sistema asume un bit de referencia inicial 1

Se muestra el circuito y los flujos de datos original $b(t)$ y secundario $b'(t)$ que realimentado y retrasado origina a $b'(t- T)$.

El flujo de datos $b'(t)$ que representa el mensaje a transmitir entra al modulador balanceado provocando las fases y contrafases en concordancia con la señal binaria.

b(t) →		1	0	1	1	0	1	0	0	1
b'(t) →	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1
Fase →	0	0	π	π	π	0	0	π	0	0



$$V_{dbpsk}(t) = \frac{v(t)}{V} A \cos \omega_c t = \pm A \cos \omega_c t$$

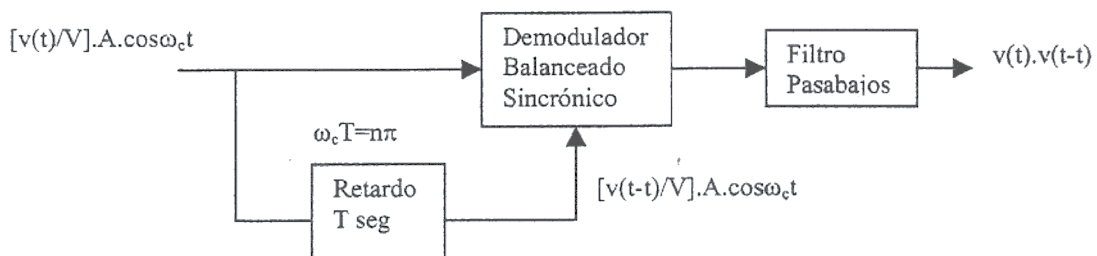
La regla que sigue el circuito lógico es:

Si $b(t) = b'(t-T) \rightarrow b(t) = 1 \quad v(t) = +V$

Si $b(t) \neq b'(t-T) \rightarrow b(t) = 0 \quad v(t) = -V$

La salida del modulador es una portadora analógica cuya fase cambia cuando b'(t) cambia

f2.-Detector DBPSK



La salida del demodulador sincrónico es :

$$\frac{v(t)}{V} A \cos \omega_c t \frac{v(t-T)}{V} A \cos \omega_c t = v(t)xv(t-T) \frac{A^2}{2V^2} (\cos \omega_c T + \cos 2\omega_c (t-T/2))$$

Para obtener $v(t) \times v(t-T)$ seleccionamos "T" para que $\cos \omega_c T = \pm 1$ (ω_c seleccionada para que la duración del bit sea un número entero de medios ciclos).

La ventaja principal de esta técnica es la simpleza de su concepción al no ser necesario ningún circuito recuperador de la portadora (cuadrador, costas, etc.), la

desventaja es con relación al ruido, se requiere de 1 a 3 dB más de relación señal a ruido para alcanzar la misma tasa de errores de bits que la técnica BPSK.

10-QAM o modulación de amplitud en cuadratura

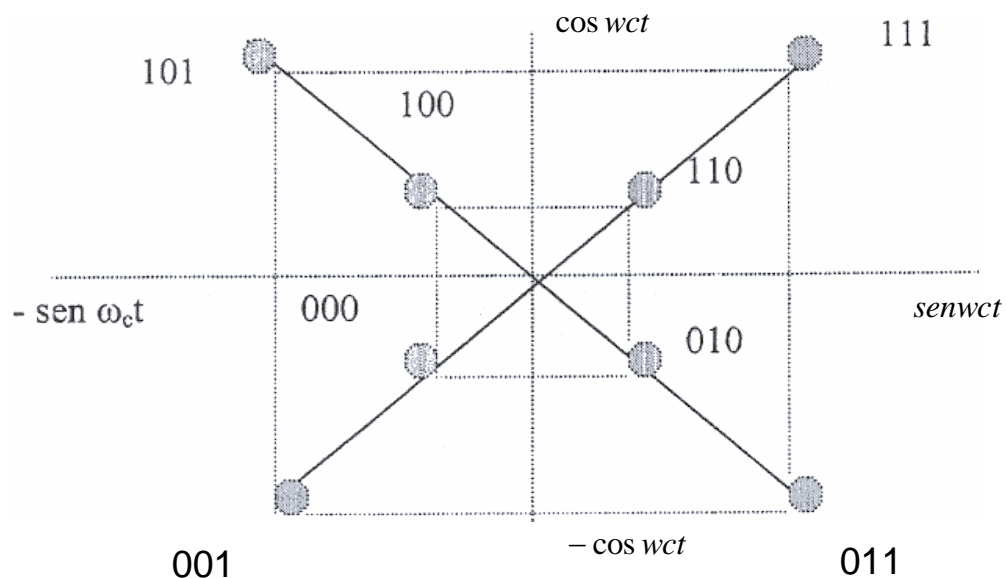
Es una forma de modulación digital donde la información está contenida en la amplitud y en la fase de la señal transmitida. .

Al igual que QPSK, 8PSK, 16PSK es una operación del tipo multinivel, en la cual, al combinar modulación en fase y amplitud se intenta mejorar el comportamiento frente al ruido.

Existen varias versiones actuales de hasta 1024QAM, solo se mostrarán a título de ejemplo 8QAM y 16QAM. .

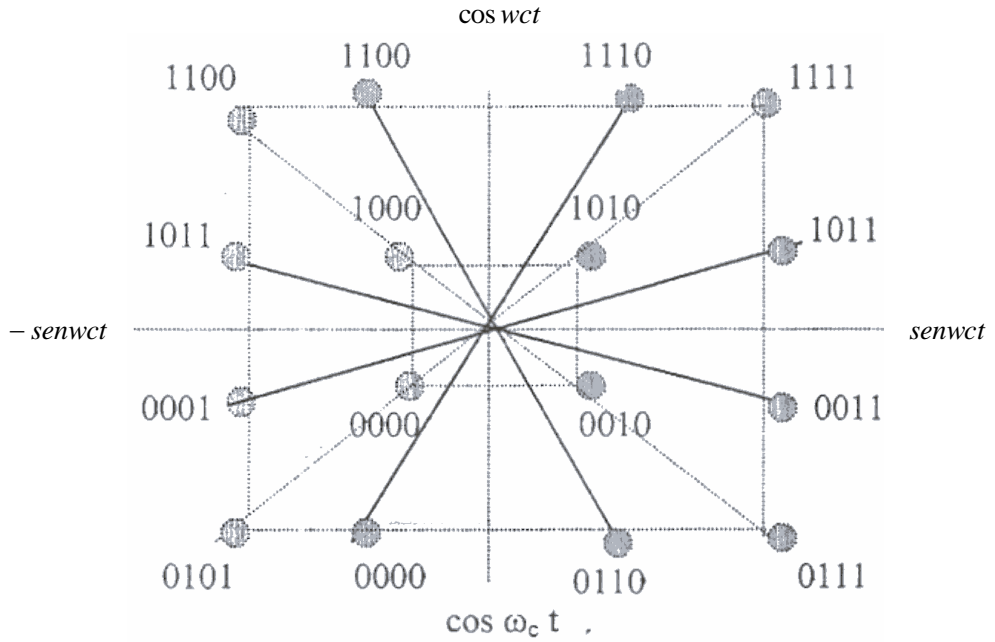
10a.-8QAM

Los datos se agrupan de a tres, resultando el siguiente diagrama de constelación, en el cual se visualizan dos amplitudes y cuatro fases diferentes. La tasa de señalización es 1/3 de la de bits.

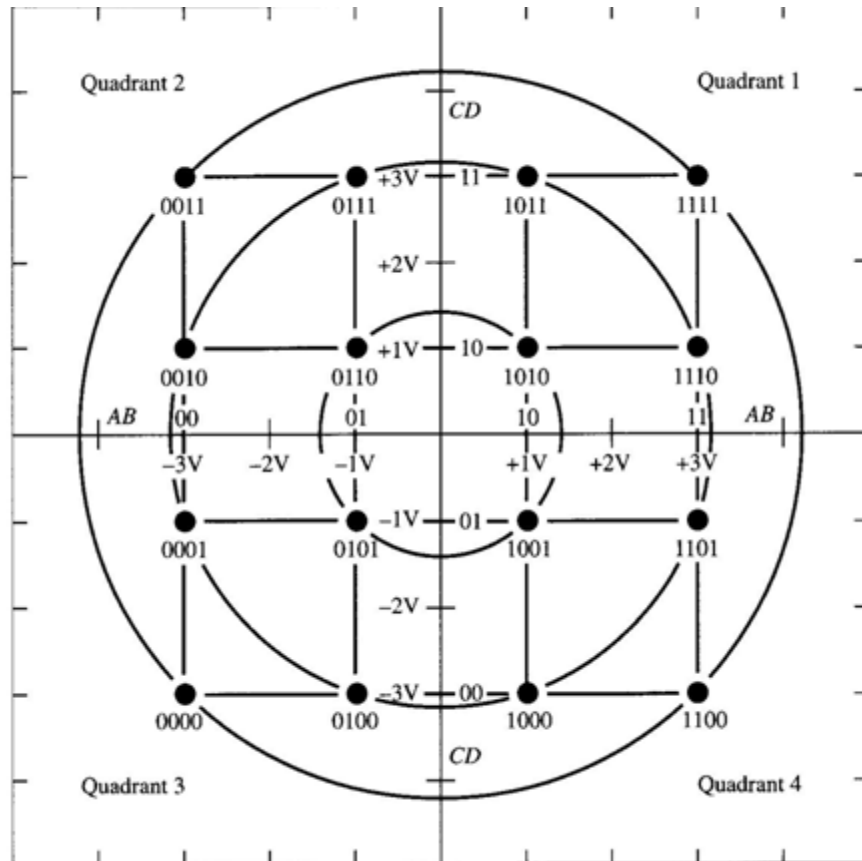


10b.-16QAM

En el 16 QAM hay 3 amplitudes distintas y 12 fases diferentes.

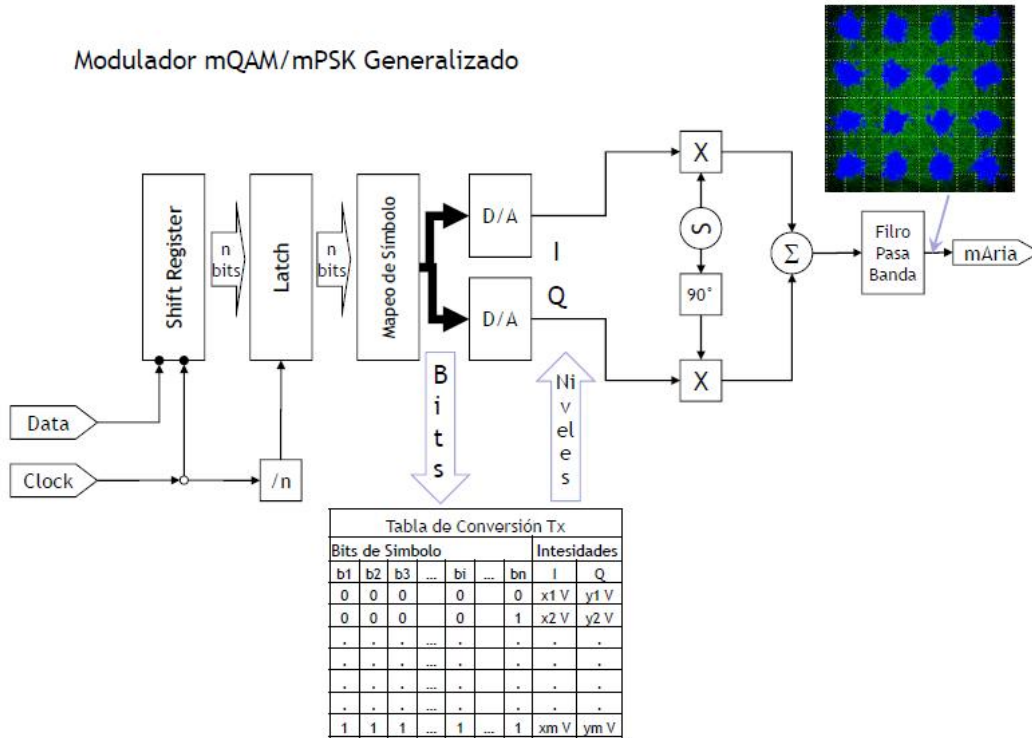


Se debe considerar que también pueden encontrarse otro tipo de orden en la constelación, por ejemplo como la siguiente, depende de la consideración de sen o cos, siempre los puntos se dan en círculos

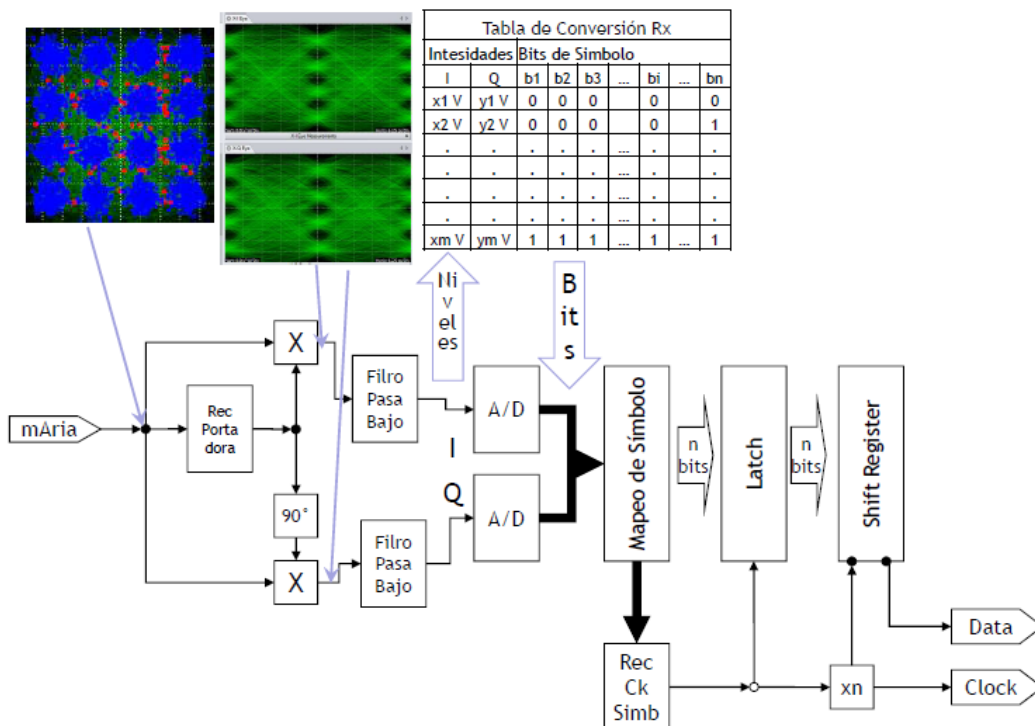


Se produce un cambio de fase o amplitud o ambas cada cuatro bits. En consecuencia la velocidad de señalización o tasa de baudios y el ancho de banda resultan 1/4 de la tasa de bits.

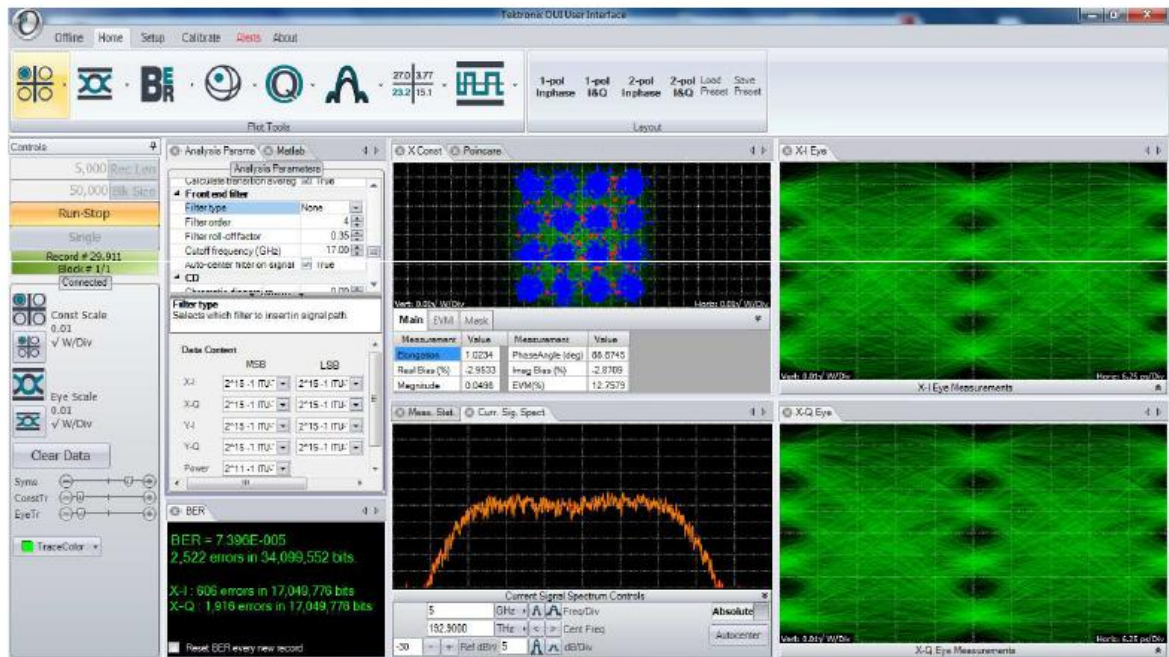
Modulador mQAM/mPSK Generalizado



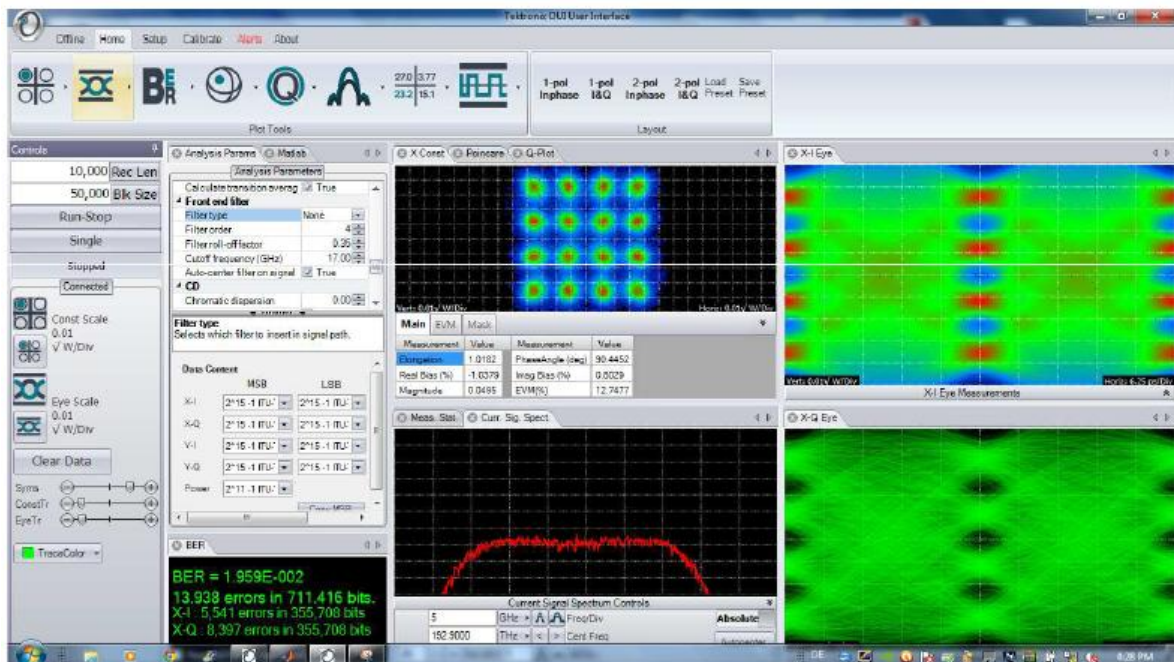
Demodulador mQAM/mPSK Generalizado



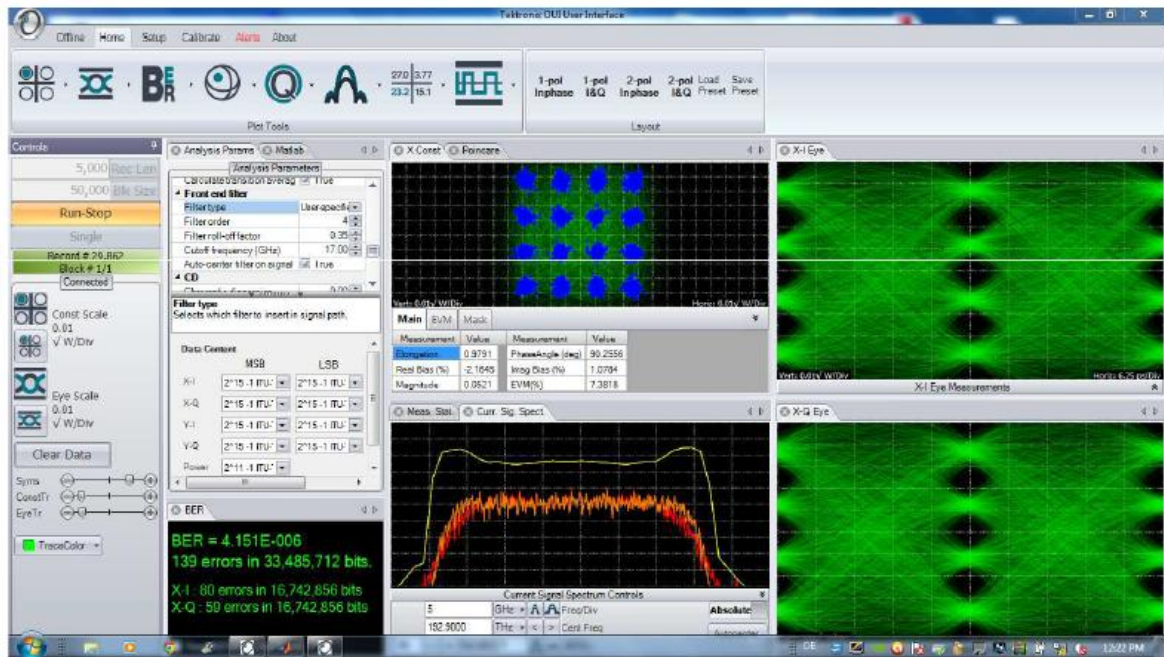
Ejemplo Rx sin filtro de mejora



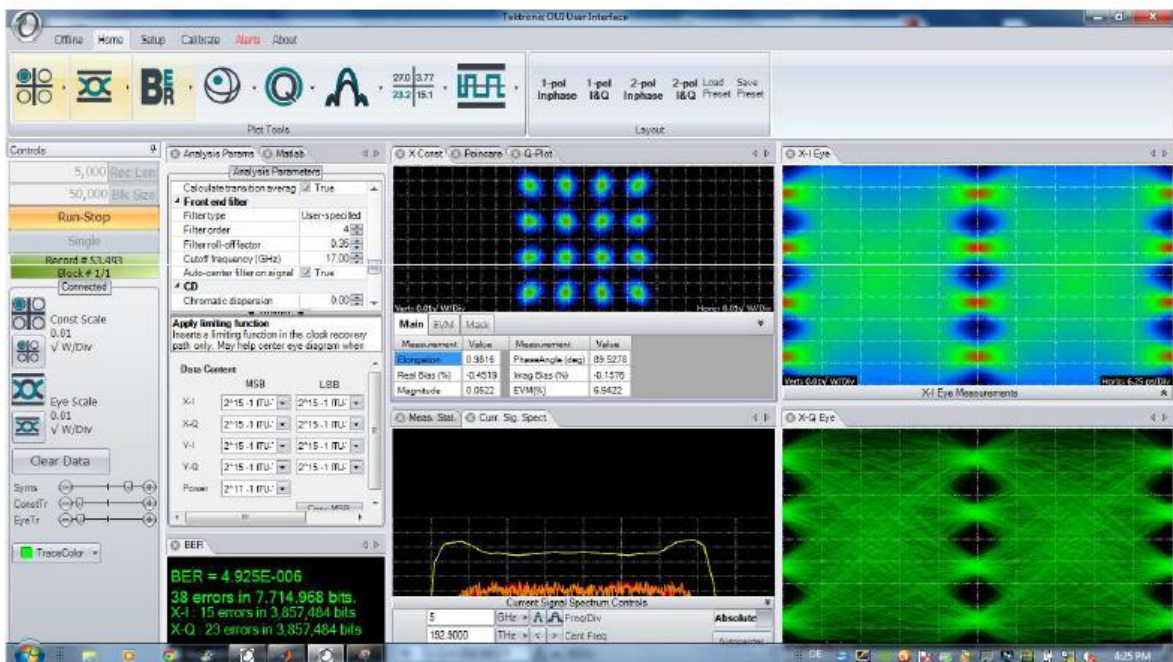
Ejemplo Rx sin filtro de mejora, con falso color según la ocurrencia del valor



Ejemplo Rx con filtro de mejora



Ejemplo Rx con filtro de mejora, con falso color según la ocurrencia del valor



11.- Comparación de BW y Eficiencia de la Modulación Digital

MODULACIÓN	CODIFICACION	BW en Hz	EFICIENCIA de BW Bits/Hz
FSK	BIT UNICO	$>F_s$	1
BPSK	BIT UNICO	F_s	1
QPSK	DIBIT	$F_b/2$	2
8 PSK	TRIBIT	$F_b/3$	3
8 QAM	TRIBIT	$F_b/3$	3
16 PSK	QUADBIT	$F_b/4$	4
16 QAM	QUADBIT	$F_b/4$	4