

PRACTICA 2

MODULACIONES

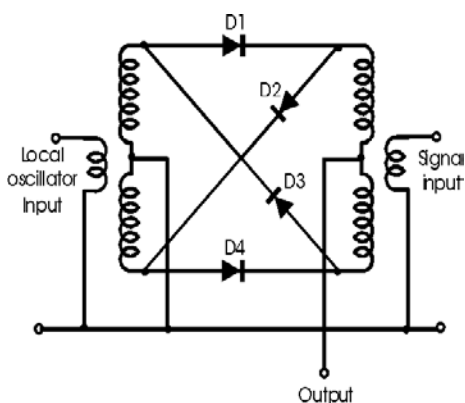
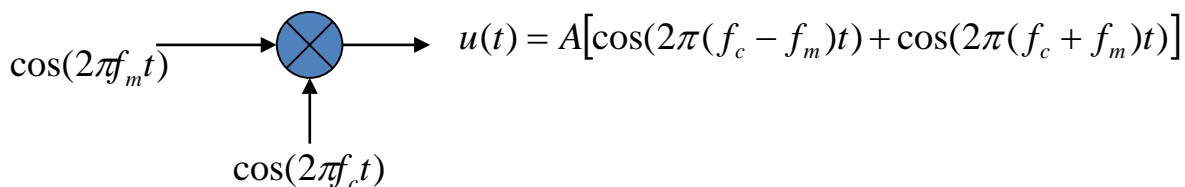
1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	2
1.1. MODULACIONES LINEALES	3
1.1.1. Modulación en doble banda lateral (DBL)	3
1.1.2. Modulación de amplitud (AM).....	5
1.1.3. Modulación en banda lateral única (BLU)	8
1.2. MODULACIONES ANGULARES: MODULACIÓN DE FRECUENCIA Y FASE.	11
1.3. MODULACIONES DIGITALES	12
1.3.1. Modulación ASK (Amplitude Shift Keying)	14
1.3.2. Modulación PSK (Phase Shift Keying).....	16
1.3.3. Modulación QPSK.....	18
1.3.4. Modulación FSK (Frequency Shift Keying).....	19
2. DESCRIPCION DE LAS PLACAS	21
2.1. PLACA MODULADOR I-Q.....	21
2.2. PLACA OSCILADOR LOCAL FI.....	22
2.3. PLACA AMPLIFICADOR FI-TX.....	22
2.4. PLACA CON DEMODULADOR COHERENTE Y DE ENVOLVENTE	23
2.5. MODULACIONES DIGITALES. BANDA BASE-TRANSMISIÓN.....	23
2.6. PLACA CONVERTOR S/P	24
2.7. PLACA DEMODULADOR I&Q.	25
2.8. PLACA MODULADOR DE FASE.	25
3. MONTAJES Y MEDIDAS EN EL LABORATORIO	27
3.1. EXPERIMENTO Nº 1. OBTENCIÓN DE UNA SEÑAL MODULADA EN AMPLITUD (AM)	28
3.2. EXPERIMENTO Nº 2. OBTENCIÓN DE UNA SEÑAL MODULADA EN DBL	31
3.3. EXPERIMENTO Nº 3. DEMODULACIÓN DE LAS SEÑALES AM Y DBL.....	32
3.4. EXPERIMENTO Nº 4. OBTENCIÓN DE UNA SEÑAL MODULADA EN ASK	35
3.5. EXPERIMENTO 5. DIAGRAMAS DE OJO.	37
3.6. EXPERIMENTO 6. MODULACIÓN BPSK.....	39
3.7. EXPERIMENTO 7. MODULACIÓN QPSK	41
3.8. EXPERIMENTO 8. CONSTELACIÓN QPSK. EFECTO DEL CANAL.....	42

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Como veremos a lo largo del desarrollo de esta práctica, la base (electrónica) para la generación de señales moduladas paso banda es la utilización de un dispositivo no lineal que permite el producto analógico de señales: en concreto se pretende multiplicar la señal información (señal en banda base) por una señal portadora sinusoidal de mayor frecuencia (frecuencia intermedia) para transferir la información a esta nueva frecuencia (el fenómeno de demodulación es el dual: se realiza el producto de la señal ya modulada en frecuencia intermedia por la misma portadora para conseguir la señal demodulada de baja frecuencia).

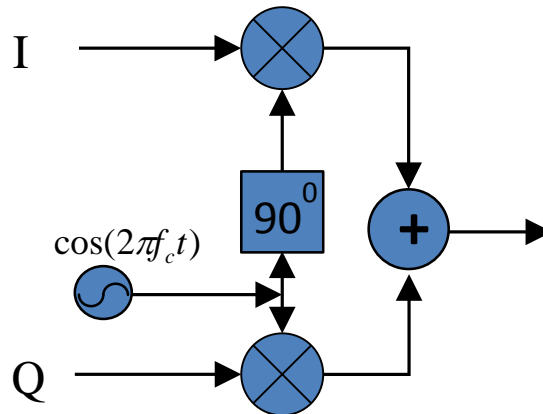
El producto analógico de ambas señales se puede efectuar de manera electrónica de múltiples formas, aprovechando siempre la característica no lineal de un dispositivo semiconductor. Lo más habitual es utilizar diodos en configuraciones simple (un solo diodo), balanceada (dos diodos) o doblemente balanceada (anillo de cuatro diodos). Esta complejidad adicional redonda en mejores prestaciones en cuanto al número y amplitud de los productos de intermodulación generados en el mezclador. Las estructuras balanceadas se suelen denominar de doble banda lateral pues eliminan el término correspondiente a la portadora (presente en estructuras no balanceadas).

El dispositivo que se va a utilizar en la práctica es un modulador doblemente balanceado construido mediante un puente de diodos en anillo.



El modulador I&Q (o modulador universal), mediante la utilización de dos moduladores balanceados que usan señales de portadora desfasadas 90 grados, permite obtener distintas señales moduladas sin más que acondicionar convenientemente las entradas de señal

moduladora (I y Q). Es muy utilizado en modulaciones digitales.



1.1. MODULACIONES LINEALES

1.1.1. Modulación en doble banda lateral (DBL)

La modulación en doble banda lateral es la más sencilla desde un punto de vista conceptual puesto que consiste directamente en el producto de las señales moduladora y portadora. La expresión en el dominio del tiempo de una señal DBL es:

$$y(t) = Ax(t) \cdot \cos \omega_c t$$

es decir, la señal DBL se obtiene multiplicando la señal moduladora por la portadora. Su espectro vendrá dado por:

$$Y(f) = \frac{A}{2} [X(f - f_c) + X(f + f_c)]$$

Para el caso que $x(t) = \cos(\omega_m t)$, tendríamos:

$$y(t) = A \cos \omega_m t \cos \omega_c t = \frac{A}{2} [\cos(\omega_c - \omega_m)t + \cos(\omega_c + \omega_m)t]$$

y su espectro:

$$Y(f) = \frac{A}{4} [\delta(f - f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m) + \delta(f - f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)]$$

Por tanto, el espectro de la señal modulada es idéntico al de la señal mensaje trasladado a f_c . En algunos casos se deja alguna pequeña cantidad de portadora para facilitar el proceso de recepción (DBL con reinyección de portadora). En otros casos se pretende hacer una DBL pura pero debido a imperfecciones del modulador queda algún residuo de dicha portadora. Se denomina **rechazo de portadora** al nivel de dicha portadora residual frente a la potencia total,

y es una típica medida de la calidad del modulador. La figura 1.1 muestra la señal modulada en DBL cuando la moduladora es un tono de frecuencia f_m .

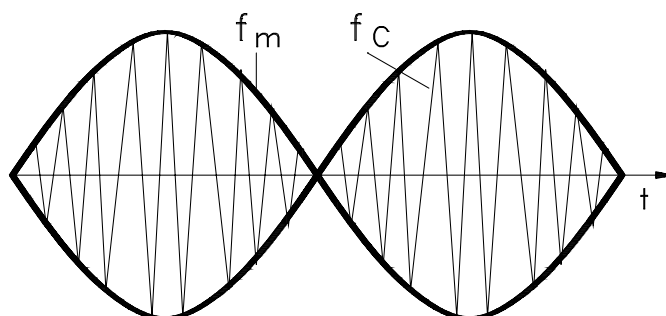


Figura 1.1. Señal DBL en el dominio del tiempo

Modulador de DBL

Para la generación de una señal modulada en DBL se aplican ambas señales al dispositivo modulador balanceado.

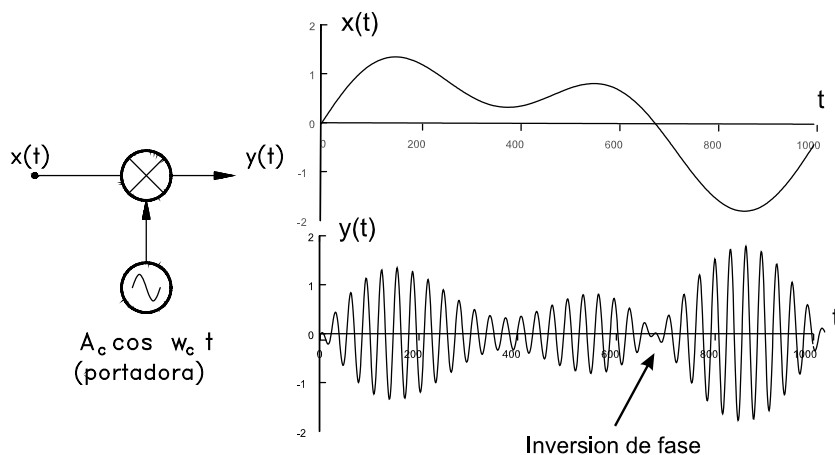


Figura 1.2. Generación de la modulación DBL. Variación temporal de las señales moduladora y modulada

Demodulador de DBL

Para la demodulación de una señal DBL es necesario realizar un proceso de demodulación que se denomina DEMODULACIÓN COHERENTE. Esta forma de demodular la señal es válida para otras muchas técnicas de modulación y tiene excelentes prestaciones. Su denominación proviene de que los osciladores utilizados para modular (transmisor) y demodular (receptor) deben ser coherentes, es decir, su frecuencia ha de ser exactamente la misma, además, han de estar enganchados en fase, (o sea, tener la misma fase o una deriva de fase constante). Por tanto, la demodulación DBL se obtiene volviendo a multiplicar la señal modulada por la portadora y sometiendo al producto a un filtro paso bajo, de acuerdo con la figura 1.3.

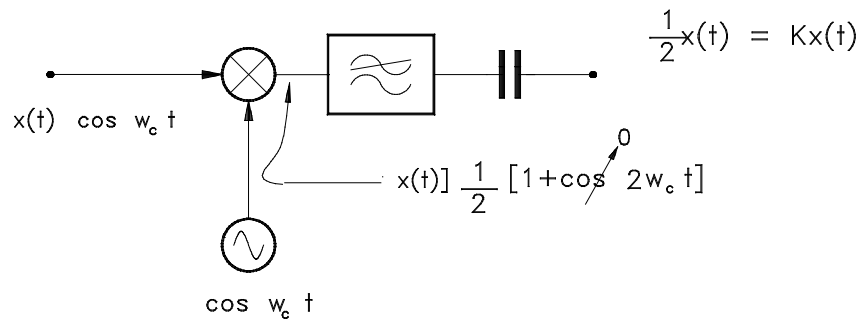


Figura 1.3. Demodulador coherente DBL

1.1.2. Modulación de amplitud (AM)

La expresión de una señal modulada en amplitud viene dada por:

$$y(t) = [A_c + A_m x(t)] \cdot \cos \omega_c t$$

donde $c(t)=A_c \cdot \cos \omega_c t$ es la señal portadora, $x(t)$ es la señal moduladora. Llamando m al índice de modulación, definido por:

$$m = \frac{A_m}{A_c} / x|_{\max}$$

la señal modulada puede expresarse como:

$$y(t) = A_c [1 + m x_N(t)] \cos \omega_c t$$

$$x_N(t) = \frac{x(t)}{|x|_{\max}} \leq 1$$

Este parámetro establece la intensidad de la modulación y puede variar en la práctica entre 0 (ausencia de modulación) y 1 (100% de modulación). La figura 1.4 muestra tres ejemplos de modulación AM por una moduladora sinusoidal. Uno de ellos corresponde a un caso de sobremodulación ($m > 1$).

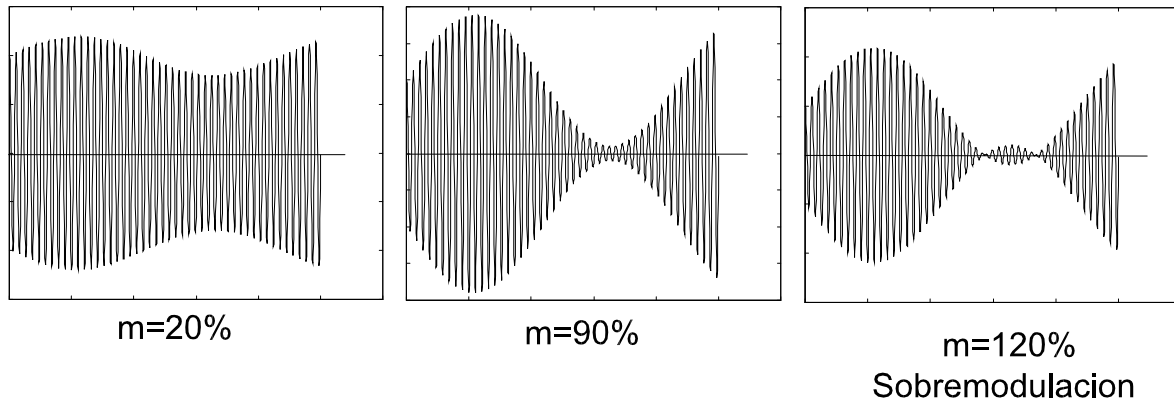


Figura 1.4 Señal modulada en AM con índices de modulación del 20%, 90% y 120% (sobremodulación)

Utilizando la propiedad de modulación de la transformada de Fourier el espectro de la señal modulada viene dado por:

$$Y(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{mA_c}{2} [X(f - f_c) + X(f + f_c)]$$

Es muy ilustrativo el caso de una modulación cuando la señal moduladora es un tono, es decir, $x(t) = \cos \omega_m t$. En este caso la expresión de la onda modulada es:

$$\begin{aligned} y(t) &= A_c [I + m \cos \omega_m t] \cos \omega_c t = \\ &= A_c \cos \omega_c t + \frac{mA_c}{2} [\cos(\omega_c - \omega_m)t + \cos(\omega_c + \omega_m)t] \end{aligned}$$

y su espectro será:

$$\begin{aligned} Y(f) &= \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{mA_c}{4} [\delta(f - f_c + f_m) + \delta(f + f_c - f_m)] + \\ &+ \frac{mA_c}{4} [\delta(f - f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)] \end{aligned}$$

Por lo tanto, el espectro de una señal modulada en AM por un tono consta de una raya espectral, correspondiente a la portadora, más un par de rayas espectrales separadas f_m de la portadora, que son las bandas laterales. Al aumentar m , la potencia de las bandas laterales, las que transportan la información, también aumenta, tal como muestra la figura 1.5. Puede demostrarse fácilmente que la potencia de cada una de las rayas respecto a la de portadora es:

$$P_{RAYA} / P_c = \frac{m^2}{4}$$

Para que no haya sobremodulación las rayas laterales deberán, por tanto, estar más de 6dB por

debajo de la portadora. La figura 1.5 muestra el espectro de las tres señales moduladas que aparecen en la figura 1.4.

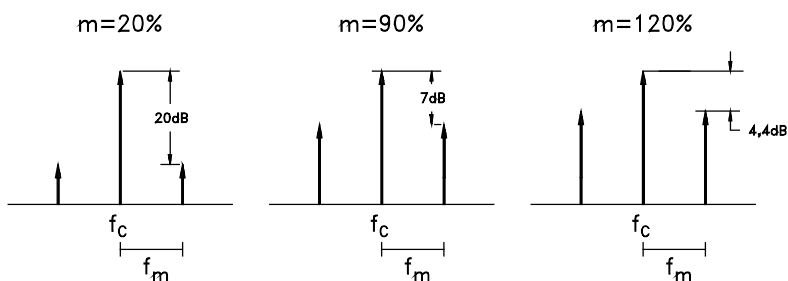


Figura 1.5. Espectro de la señal AM en función de m

Modulador de AM

La forma más sencilla de obtener una señal modulada en AM consiste, cómo se verá en el EXPERIMENTO nº 1, en multiplicar una señal portadora por una señal moduladora a la que se ha superpuesto un nivel de continua. Obsérvese que de esta forma se garantiza que la magnitud $A_c + A_m x(t)$, no pasa nunca por cero y, por tanto, esa magnitud es la envolvente de la señal, tal como se muestra en la figura 1.6.

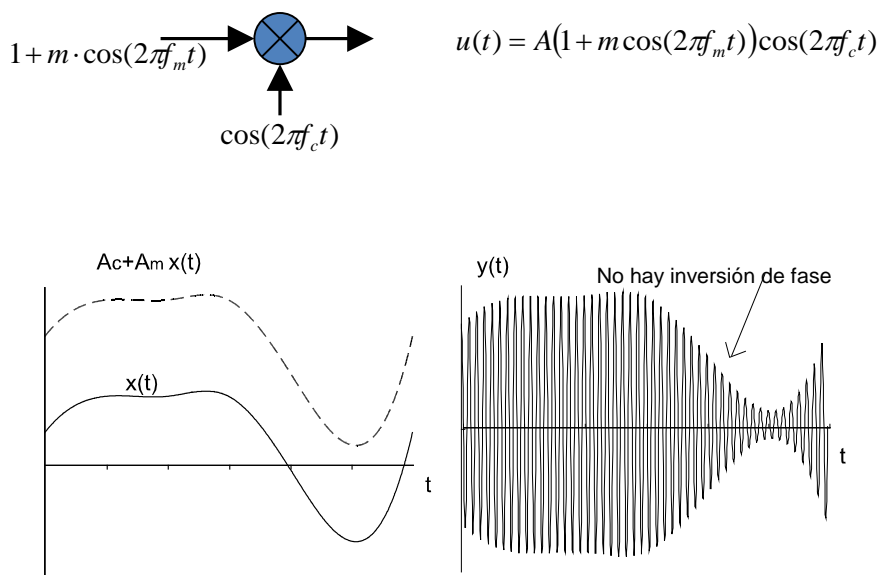


Figura 1.6. Modulación AM de una portadora de valor máximo A_c mediante una señal $x(t)$ con continua

El producto analógico de ambas señales se realizará de nuevo mediante un modulador

doblemente balanceado.

Demodulador de AM

La gran ventaja de la modulación AM es que el proceso de demodulación es más sencillo que en las otras modulaciones de amplitud. Por ello, se utilizó inicialmente en radiodifusión, y todavía se emplea en aquellos sistemas donde los receptores tienen que ser muy baratos.

La modulación AM admite DEMODULACIÓN NO COHERENTE, es decir, sin necesidad de una referencia de la portadora. La forma más simple de hacerlo es utilizar un detector de envolvente (un rectificador), de acuerdo con el esquema que se muestra en la figura 1.13.

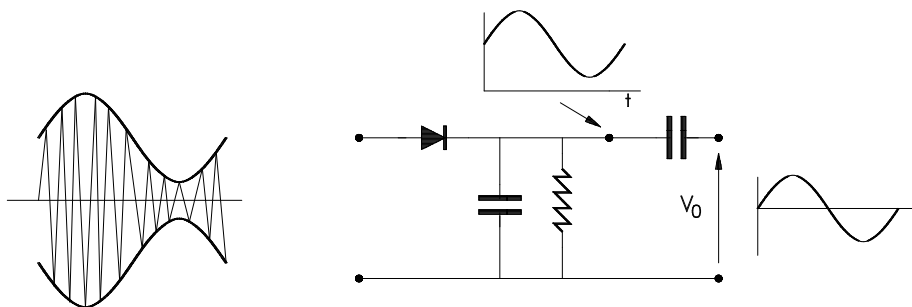


Figura 1.7. Demodulación de una señal AM mediante un detector de envolvente

Por supuesto, la modulación AM también admite demodulación coherente.

1.1.3. Modulación en banda lateral única (BLU)

La transmisión de ambas bandas laterales es redundante y supone un gasto innecesario de ancho de banda, el cual puede reducirse a la mitad, si se suprime una de las bandas laterales. Con la modulación BLU, en cualquiera de sus versiones: Banda Lateral Superior (BLS) o Banda Lateral Inferior (BLI), se transmite estrictamente el mismo ancho de banda que el de la señal moduladora. Por lo tanto, la modulación BLU es igual que la DBL pero suprimiendo una de las bandas laterales.

Para una moduladora arbitraria $x(t)$, la expresión de la onda modulada $y(t)$ viene dada por:

$$y(t) = \frac{I}{2} A [x(t) \cos \omega_c t \pm \hat{x}(t) \sin \omega_c t]$$

donde el signo - es para el caso de BLS y el + para el de BLI, y $\hat{x}(t)$ es la transformada de Hilbert de $x(t)$. Su expresión en el dominio del tiempo para un tono $x(t) = \cos \omega_m t$, y considerando

la banda lateral superior, viene dado por:

$$y(t) = \frac{1}{2} A \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

es decir, sería una señal sinusoidal de frecuencia (f_c+f_m) . Su espectro vendría dado por:

$$Y(f) = \frac{A}{4} [\delta(f - f_c - f_m) + \delta(f + f_c + f_m)]$$

Modulador de BLU

El esquema teórico de un modulador BLU por cambio de fase (usando un modulador I&Q) se muestra en la figura 1.8. Se necesitan, por tanto, dos señales de banda fase desfasadas 90° (una es la transformada de Hilbert de la otra) para atacar al modulador I&Q.

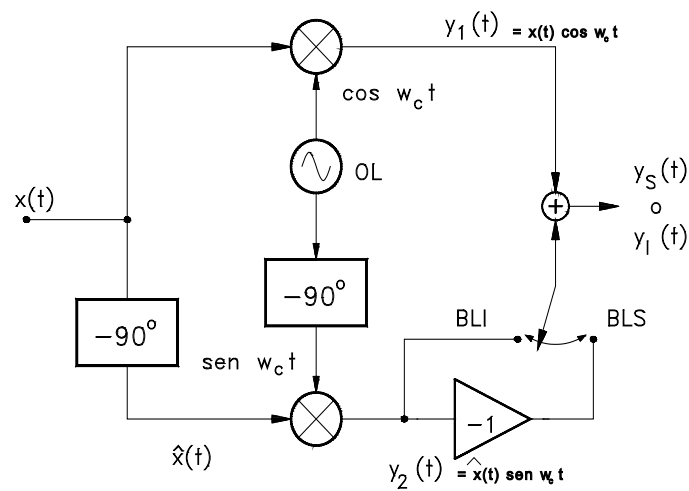


Figura 1.8. Modulador BLU por cambio de fase

Normalmente la banda de trabajo de este tipo de modulador viene limitada por el desfasador de 90 grados utilizado para la señal moduladora ya que puede requerírsele una banda porcentual muy grande.

Demodulador de BLU

La modulación BLU exige también una demodulación coherente, como se muestra la figura 1.9.

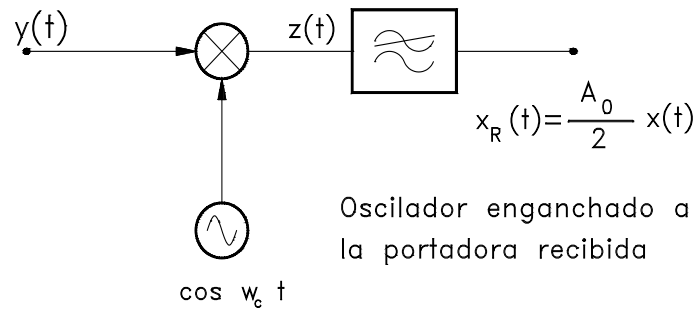


Figura 1.9. Demodulador coherente de BLU

En este caso, para que la señal se reciba sin distorsión se debe cumplir que $\theta(t)=0$, es decir, el oscilador debe estar enganchado en frecuencia y en fase sin ningún desfase. Esta es una diferencia importante respecto de la demodulación DBL, pues complica la realización del receptor.

La figura 1.10 muestra el espectro de las distintas modulaciones de amplitud estudiadas, suponiendo que la señal moduladora es un tono.

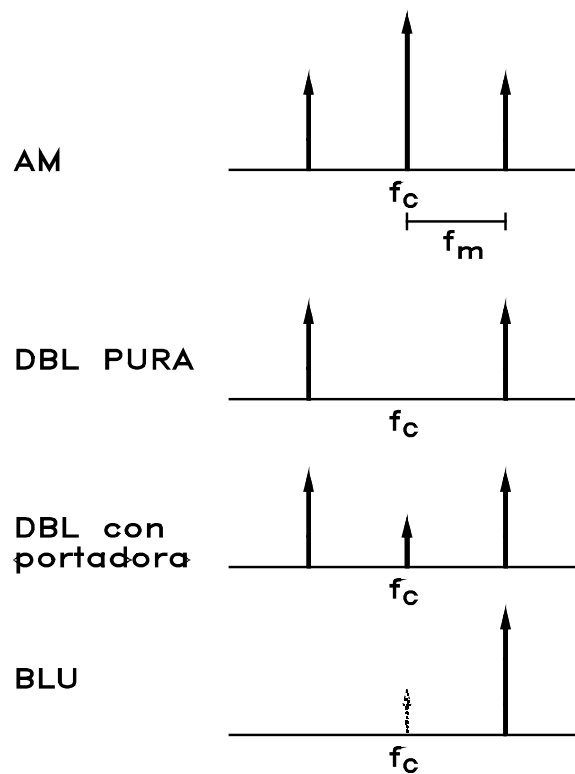


Figura 1.10. Espectro de las distintas modulaciones de amplitud con un tono

1.2. MODULACIONES ANGULARES: MODULACIÓN DE FRECUENCIA Y FASE.

Las modulaciones angulares se denominan así, porque introducen la información (señal moduladora) en la fase de la portadora, manteniendo constante la amplitud. Su representación matemática será:

$$y(t) = A_c \cos[\omega_c t + \varphi(t)] = A_c \cos \theta(t)$$

donde $\varphi(t)$ estará relacionada con $x(t)$ de alguna forma (depende del tipo de modulación).

Básicamente existen dos modulaciones angulares:

- De fase o PM (Phase Modulation)
- De frecuencia o FM (Frequency Modulation)

La modulación se denomina de fase si la función $\varphi(t)$ es proporcional a la señal moduladora:

$$\varphi(t) = K_P x(t)$$

La modulación se denomina de frecuencia si la desviación de la frecuencia instantánea es proporcional a la señal moduladora.

$$f_i(t) - f_c = f_d(t) = K_F x(t)$$

La diferencia entre ambas puede apreciarse en la figura 1.11.

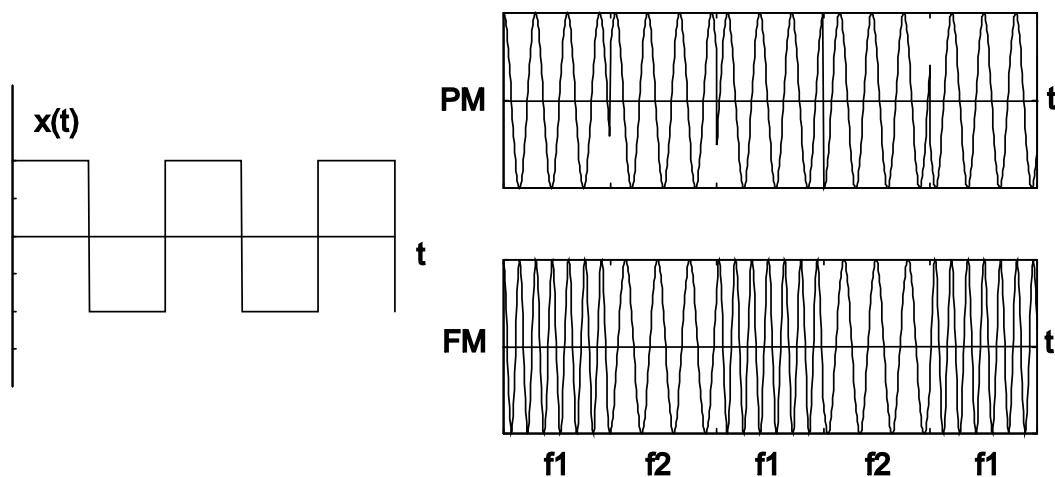


Figura 1.11. Comparación entre las modulaciones PM y FM

Su representación matemática es:

$$PM : y_p(t) = A_c \cos[\omega_c t + K_P x(t)] = A_c \cos[\omega_c t + \beta x_N(t)]$$

donde:

β : índice de modulación o máxima desviación de fase ($\beta = K_P |x(t)|_{\max}$)

$x_N(t)$: señal moduladora normalizada

$$FM : y_F(t) = A_c \cos[\omega_c t + 2\pi K_F \int_{-\infty}^t x(\alpha) d\alpha] = A_c \cos[\omega_c t + 2\pi f_D y_N(t)]$$

donde f_D es la máxima desviación de frecuencia e $y_N(t)$ es:

$$y_N(t) = \int_{-\infty}^t x_N(\alpha) d\alpha$$

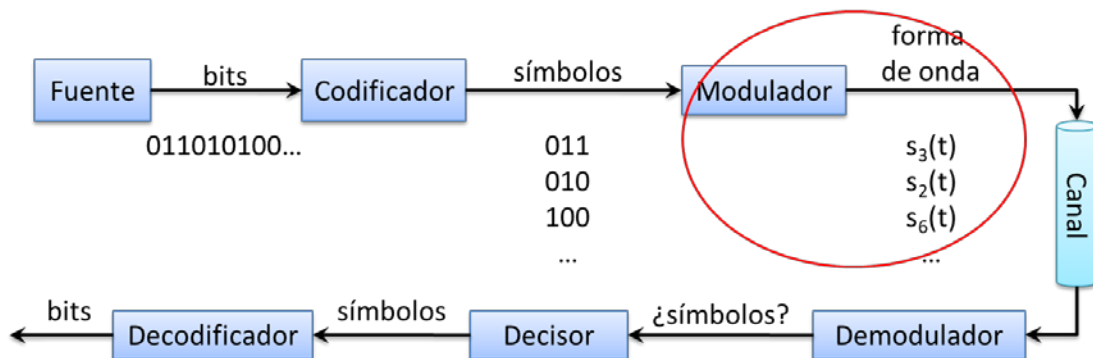
Efectivamente, la desviación de frecuencia de esta señal es proporcional a la señal moduladora, alcanzando como valor máximo f_D ($f_D = K_F |x(t)|_{\max}$):

$$f_d(t) = f_i(t) - f_c = f_D \frac{d y_N(t)}{dt} = f_D \cdot x_N(t)$$

En la práctica 3 (PLLs) se verán ambas formas de modulación.

1.3. MODULACIONES DIGITALES

El objetivo de las modulaciones digitales es transmitir una serie de símbolos -formados por uno o varios bits- a través de un canal paso banda. Los diferentes símbolos se codifican mediante un conjunto discreto de señales, de tal forma que, en el modulador, **a cada símbolo se le hace corresponder una determinada forma de onda analógica**. Cada T segundos (duración de un símbolo) se envía una de estas señales. Es importante notar que dado que las medidas se harán sobre las señales enviadas $s_i(t)$, éstas medidas darán información sobre T, es decir, sobre la duración de un símbolo. Sólo el conocimiento del tipo de modulación permite obtener información sobre la duración del bit.



Es normal que el conjunto de señales empleadas para definir los distintos símbolos sea un conjunto de sinusoides, todas ellas de la misma frecuencia, con diferentes amplitudes y fases. Cada una se representa por un vector (punto) en el plano complejo (figura 1.12). Para designar varios símbolos, serán necesarias varias señales, obteniéndose la constelación asociada a esa modulación (figura 1.13).

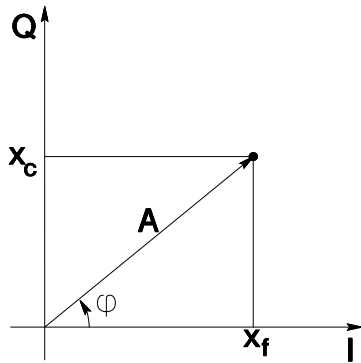


Figura 1.12 Representación fasorial de una señal.

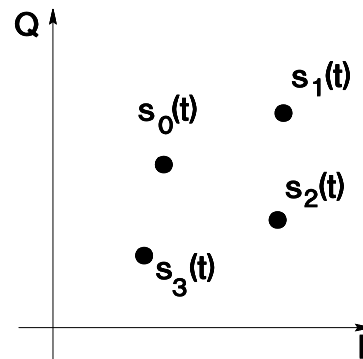


Figura 1.13 Constelación con 4 símbolos (M=4).

Un parámetro interesante es la eficiencia espectral de cada tipo de modulación. Se define como la cantidad de bits/s (régimen binario, V_T) que pueden transmitirse por cada hertzio de ancho de banda ocupado (B_T):

$$ef = \frac{V_T(\text{bit/s})}{B_T}$$

Cuanta mayor eficiencia espectral menor será el ancho de banda ocupado por la señal modulada para un régimen binario dado.

Interferencia entre símbolos (Figura 1.14). En una modulación digital se transmite idealmente un símbolo cada T segundos. Una señal de duración finita, un pulso cuadrado, por ejemplo, ocupa un ancho de banda infinito. Por razones de economía espectral, se limita el ancho de banda de las modulaciones, lo que se traduce en una deformación de las señales en el dominio del tiempo: los pulsos transmitidos se alargan en el tiempo e interfieren unos con otros. Este fenómeno se denomina Interferencia Entre Símbolos (IES) y se traduce en un incremento de la probabilidad de error. Cada modulación tiene un ancho de banda mínimo asociado que garantiza que no existe interferencia entre símbolos, es decir, existen instantes de tiempo donde la IES se anula. Estos son los instantes que se deben elegir para muestrear la señal recibida y recuperar la información.

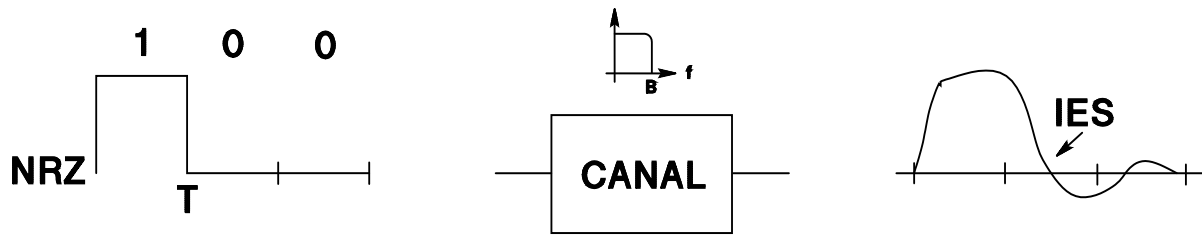


Figura 1.14 Interferencia entre símbolos.

Para visualizar la IES en un sistema de transmisión digital, se utiliza un osciloscopio sincronizado con la señal de reloj. De esta forma, se presentan a la vez todas las transiciones de la señal, de modo que se puede observar el deterioro por IES. La figura formada se denomina *diagrama de ojo* y da información sobre la calidad de la transmisión (véase la figura 1.15 donde se representa un diagrama de ojo en el que existen dos instantes óptimos de muestreo por bit en los que es posible muestrear sin IES).

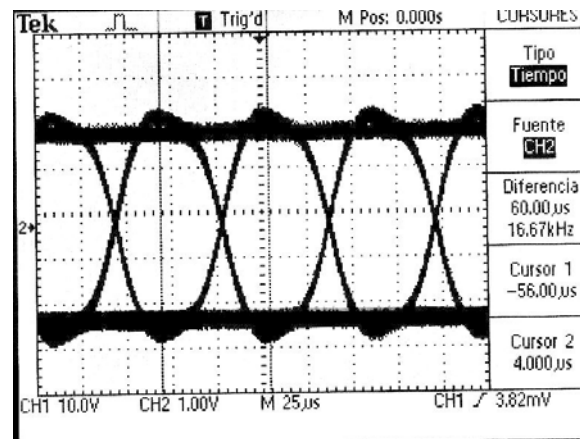


Figura 1.15 Diagrama de ojo.

1.3.1. Modulación ASK (Amplitude Shift Keying).

Definición, generación y demodulación.

La versión básica (binaria) de este sistema consiste en emitir una senoide de amplitud A y frecuencia f_0 para denotar un "1" y ausencia de señal para el símbolo "0", tal como muestra la figura 1.16.

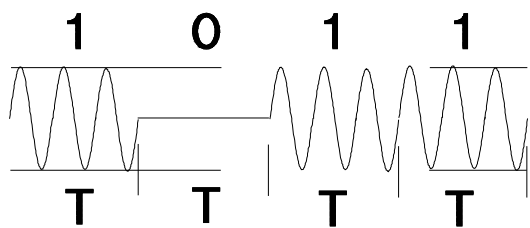


Figura 1.16 Modulación ASK en el dominio del tiempo.

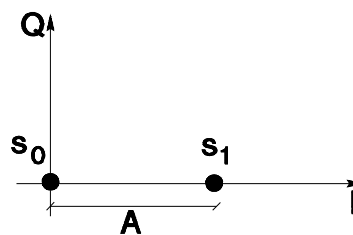
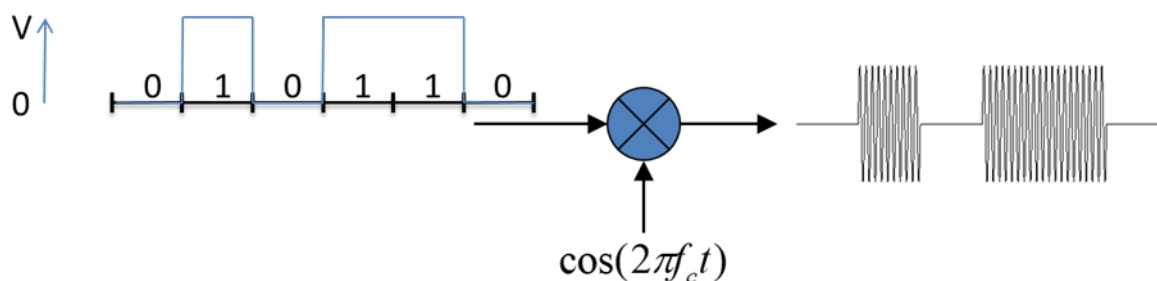


Figura 1.16b Constelación ASK.

Puede obtenerse atacando directamente con la señal de datos (si es unipolar) a un modulador doblemente balanceado (equivalente a una AM con m=100%).



La demodulación de la señal ASK es similar a la de AM. Puede utilizarse un simple diodo detector (demodulación incoherente) o recuperar la portadora en recepción y multiplicar la señal recibida por la portadora recuperada (demodulación coherente).

Propiedades. Eficiencia espectral.

La densidad espectral de potencia será la de un código NRZ unipolar, trasladado a f_0 (figura 1.17), o, lo que es lo mismo, la de un código bipolar trasladado y con portadora.

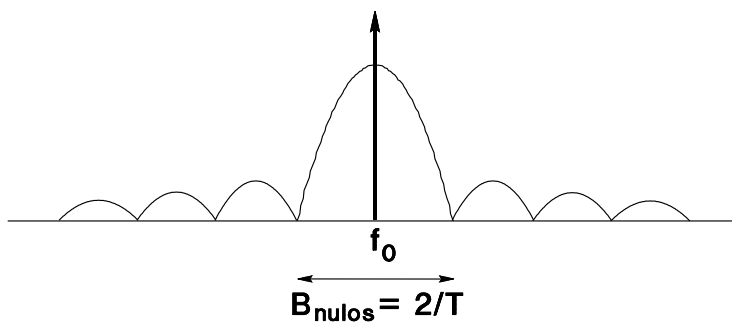


Figura 1.17 Espectro de ASK

El espectro unilateral de esta señal para datos aleatorios es:

$$S(f) = \frac{A^2}{8} \delta(f - f_o) + \frac{A^2}{8} T \left[\frac{\text{sen} [\pi T (f - f_o)]}{\pi T (f - f_o)} \right]^2$$

El espectro consta de una *sinc* más la *portadora*. Será tanto más estrecho cuanto mayor sea T, aunque se extiende hasta el infinito. Para poder emitirlo es necesario limitarlo en banda. Si se hace con un filtro ideal puede demostrarse que la mínima anchura posible para recuperar los datos sin IES es igual a la mitad del lóbulo principal de la sinc, 1/T (Teorema de Nyquist). Por tanto, la eficiencia espectral de esta modulación es de 1 bit/s/Hz en el mejor de los casos. En la práctica, no es posible realizar filtros ideales y se utilizan filtros en "coseno alzado" que requieren un ancho de banda mayor, aunque evitan la IES.

La potencia contenida en la raya de portadora es la mitad de la potencia total (suponiendo datos totalmente aleatorios), de tal forma que, en primera aproximación, la potencia media de la señal es el doble de la potencia de portadora. La potencia de las bandas laterales puede estimarse a partir del valor máximo de la sinc indicado en pantalla, S_0 dBm:

$$P_{BL} = S_0 - 10 \cdot \log(T \cdot RBW)$$

siendo RBW el ancho de banda de FI del analizador de espectros y T la duración del símbolo. El ajuste de la forma del espectro real al teórico da también una estimación de la forma más o menos distorsionada de los pulsos en el dominio del tiempo.

Se observa que hay potencia perdida en la portadora. Es un resultado típico de las modulaciones AM y se debe precisamente a que la constelación no es simétrica respecto al origen. La modulación ASK no es una modulación de envolvente constante. Su mayor y única ventaja es la sencillez, tanto en su generación como en la recepción. De hecho ASK es una modulación que apenas se usa en los sistemas comerciales ya que existen alternativas que, siendo un poco más complejas, ofrecen prestaciones superiores.

1.3.2. Modulación PSK (Phase Shift Keying)

La deformación de amplitud que sufren las señales en canales no lineales se evita utilizando modulaciones de módulo constante: las modulaciones de fase PSK tienen esta propiedad. En sistemas de transmisión con modulación PSK se envían M señales con la misma frecuencia y amplitud (es de módulo constante) pero con M fases diferentes para designar los M símbolos.

La constelación se compone de puntos desplegados sobre una circunferencia, tal como muestra la figura 1.18.

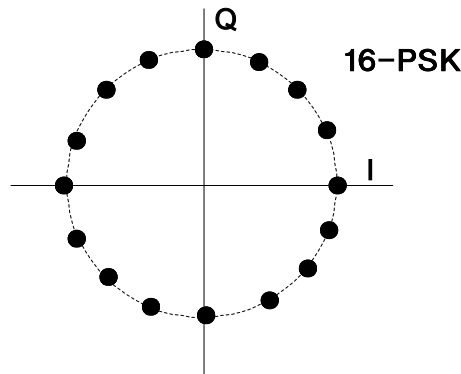


Figura 1.18 Constelación 16-PSK.

Esta modulación permite mantener el módulo constante con alta eficiencia espectral ($M \uparrow$). Sin embargo, para optimizar la probabilidad de error interesan símbolos muy separados ($M \downarrow$). Es necesario, por tanto, encontrar un compromiso entre ambos efectos. Las modulaciones PSK no suelen utilizar un gran número de símbolos porque la distancia entre ellos decrece linealmente con M . Sólo en el caso de que se requiera simultáneamente alta eficiencia espectral y envolvente constante se justifica PSK con M alto. De hecho, los esquemas más utilizados son con $M=2$ (BPSK) y con $M=4$ (QPSK).

El número de bits por símbolo de las modulaciones PSK es $N=\log_2(M)$, siendo M el número de puntos de la constelación. La eficiencia espectral teórica máxima (con filtros ideales) será por tanto de N bit/s/Hz. El espectro de las señales PSK es idéntico al de ASK si el valor de T (duración de símbolo) es el mismo, salvo que ahora desaparece la portadora. En la práctica siempre queda algún residuo de portadora que no se consigue eliminar, y se especifica a través del rechazo de portadora.

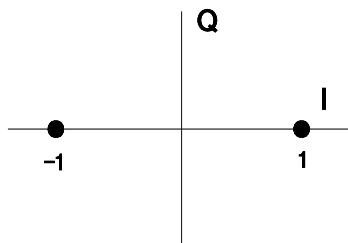


Figura 1.19 Constelación BPSK.

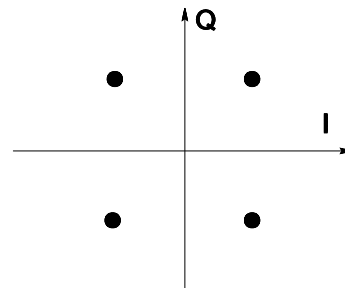
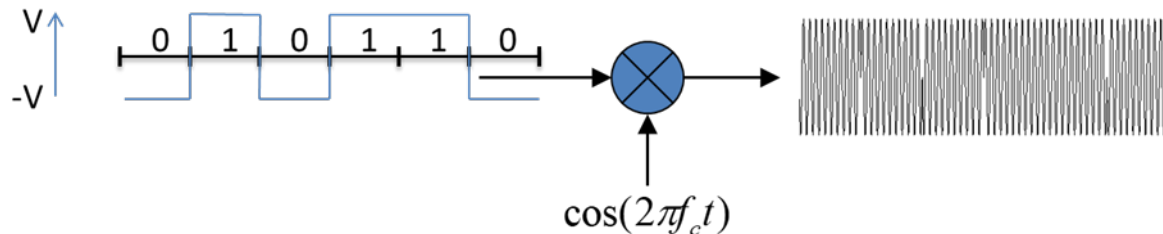


Figura 1.20 Constelación QPSK.

BPSK. Definición, generación y demodulación.

En la modulación BPSK ($M=2$) únicamente existen dos fases posibles: 0° y 180° . La constelación se muestra en la figura 1.19. Es parecida a una ASK sólo que ahora la modulación es DBL con señales bipolares. Un posible modulador es precisamente un modulador DBL con un mensaje NRZ bipolar.



La eficiencia espectral ideal de una modulación BPSK es:

$$e = 1 \text{ bit} / \text{s} / \text{Hz}$$

La constelación de los sistemas BPSK es simétrica respecto al origen: BPSK va a tener un comportamiento frente al ruido superior a ASK. Los sistemas PSK, al llevar la información en la fase, requieren recepción coherente. La demodulación de la señal BPSK es similar a la de DBL y, por tanto, debe ser coherente mediante la recuperación de la portadora en recepción y multiplicar la señal recibida por la portadora recuperada. Un esquema típico es el bucle de Costas.

Propiedades.

El espectro de la señal BPSK es idéntico al de la ASK pero sin portadora, y con toda la potencia en las bandas laterales. La expresión para el cálculo de la potencia en las bandas laterales a partir de S_0 en una modulación ASK es también válida, con la única diferencia que ahora la potencia calculada como P_{BL} será también la potencia total.

Como se ha dicho, el espectro BPSK no debe de contener portadora. Sin embargo, en la práctica siempre queda portadora residual. Una medida del rechazo de portadora (potencia de portadora frente a potencia total de salida) es una buena indicación de la calidad del modulador.

1.3.3. Modulación QPSK.

Es una modulación de fase con cuatro estados (figura 1.20). Se envían 2 bits con cada símbolo

(T segundos), uno por el canal I y otro por el Q. En la generación es necesario formar parejas de dos bits con un conversor serie/paralelo, tal como muestra la figura 1.21, de forma que se ataca a cada uno de los dos moduladores del modulador I&Q con trenes de datos a velocidad de símbolo, (velocidad de bit/2). Obsérvese que los bits impares en la representación de la figura atacan al mezclador superior mientras que los pares lo hacen al inferior.

La modulación QPSK tiene un espectro con la misma forma que el de BPSK, salvo que para la misma velocidad de transmisión tiene la mitad de anchura. La forma de determinar la potencia total es idéntica que para BPSK. La eficiencia espectral será:

$$e = 2 \text{ bit} / \text{s} / \text{Hz}$$

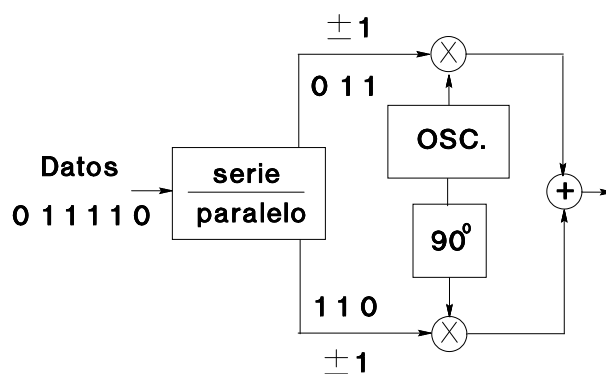


Figura 1.21 Modulador QPSK.

La demodulación de la señal QPSK (coherente) se realiza mediante un demodulador I&Q seguido de un conversor paralelo-serie que trabaja sobre las dos tramas (I y Q) obtenidas (recuperador de reloj digital). Puede verse al demodulador I&Q como dos demoduladores BPSK en cuadratura (pues no en vano, la señal QPSK se trata de dos BPSK superpuestas).

1.3.4. Modulación FSK (Frequency Shift Keying)

En FSK se envían tonos de distintas frecuencias para designar los distintos símbolos del alfabeto. Para el caso binario se tendrá una frecuencia f_0 para designar el cero lógico y f_1 para el uno lógico. Cuando se trabaja con alfabetos mayores ($M > 2$) se suele denominar a la modulación MFSK. La forma de onda en el dominio del tiempo para el caso binario aparece en la figura 1.22.

El espectro de esta señal es igual al de la ASK pero duplicado. Aparece dos veces: una centrado en f_0 y otra en f_1 . La eficiencia espectral depende de la separación entre las frecuencias.

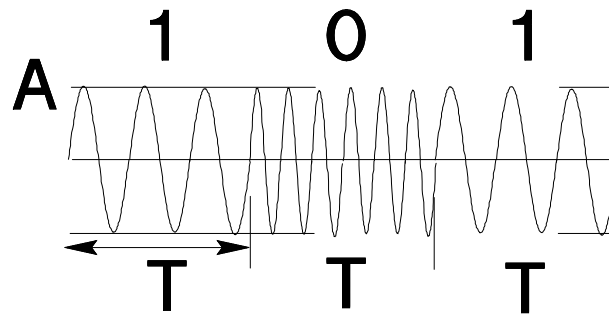


Figura 1.22 Modulación FSK de dos estados.

La señal se genera habitualmente mediante un modulador FM (VCO) atacado por un código NRZ, como se aprecia en la figura 1.23.

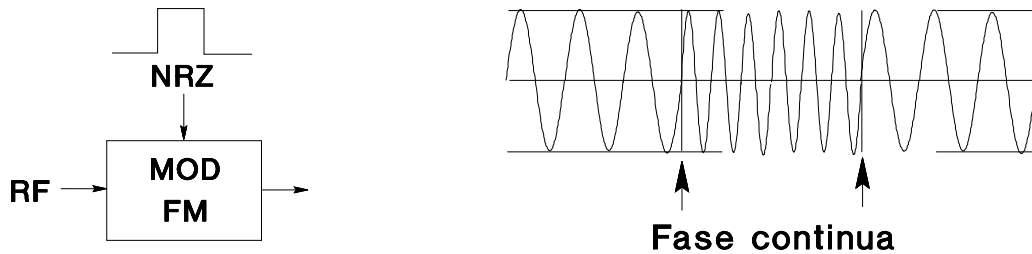


Figura 1.23 Generación de FSK mediante Modulación FM.

Propiedades. Eficiencia espectral

La mayor ventaja de FSK frente a ASK es la de ser una modulación de envolvente constante. FSK es una modulación típica de sistemas de bajo coste, como el fax o modems telefónicos de baja capacidad. El espectro FSK tiene lógicamente muchas componentes en los alrededores de las frecuencias f_0 y f_1 . La anchura de los lóbulos depende de la velocidad de símbolo y las "colas" del espectro dependen de si es o no de fase continua.

2. DESCRIPCION DE LAS PLACAS

2.1. PLACA MODULADOR I-Q

Constituye la placa base que permitirá generar los distintos tipos de modulaciones analógicas. La estructura básica de un modulador I-Q se muestra en la figura 2.1 y está constituido por dos mezcladores balanceados, un híbrido en cuadratura y un combinador de potencia en fase. El modulador I-Q se puede considerar como un modulador universal puesto que permite obtener cualquier modulación de amplitud, de fase, o de ambas.

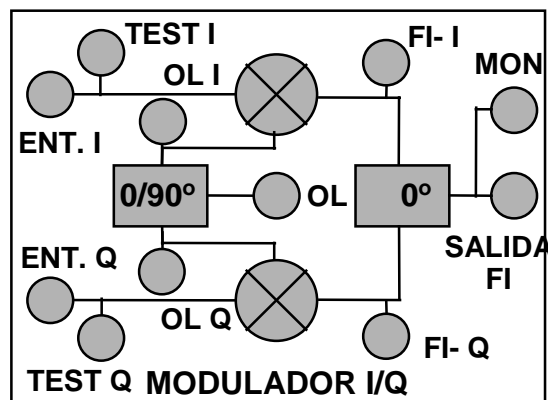


Figura 2.1 Modulador I/Q

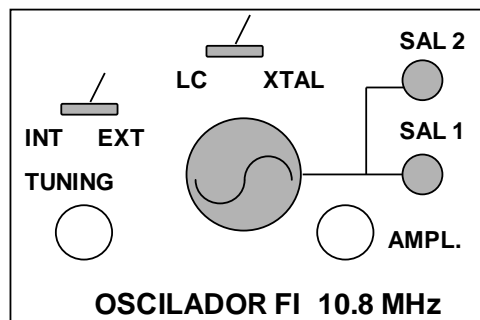
Veamos cómo con esta estructura se pueden generar las distintas modulaciones comparándolas con los esquemas teóricos estudiados en el apartado 1.3:

- a) Para la generación de una señal AM, como se verá en el montaje del **EXPERIMENTO nº 1**, se utiliza un único mezclador para multiplicar una señal portadora, generada por la placa **Oscilador Local FI**, por una señal sinusoidal superpuesta a un nivel de continua, generada por el generador de funciones, y que constituye la señal moduladora. Evidentemente, se está implementando el esquema básico de modulación AM mostrado en la figura 1.6.
- b) Para la generación de una señal modulada en DBL, el esquema es el mismo, salvo que el nivel de continua de la señal moduladora es nulo y, por tanto, pasa por cero para distintos valores del tiempo, tal como se muestra en la figura 1.2. También puede introducirse la señal moduladora (con o sin offset de DC) a través de la puerta TEST (I ó Q) puesto que estas puertas están desacopladas en DC.

- c) El esquema teórico de un modulador BLU por cambio de fase se muestra en la figura 1.8. Se necesitan, por tanto, dos señales desfasadas 90° para atacar a los dos mezcladores de la placa **Modulador I-Q**.

2.2. PLACA OSCILADOR LOCAL FI

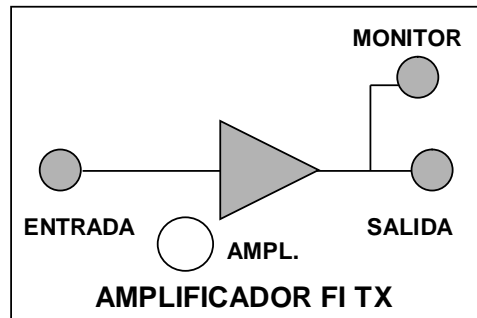
Esta placa consta básicamente de un oscilador de tipo Colpitts, cuyo circuito tanque es un cristal o un circuito LC, dependiendo de la posición **XTAL** o **LC** de uno de los conmutadores de la placa.



En ambas posiciones, la frecuencia se puede variar con un potenciómetro **FREC** situado en la misma, para lo que es necesario que el otro conmutador se encuentre en la posición **INT**. Este potenciómetro permite variar la frecuencia del oscilador en la posición **XTAL** en $\pm 0.4\text{kHz}$ y en la posición **LC** en $\pm 0.8\text{MHz}$ en torno a la frecuencia de 10.8MHz . La placa posee una entrada que permite introducir una señal de control externa. Para que ésta funcione es necesario que el conmutador esté en la posición **EXT**. Esta señal será la que se utilizará, tanto para modular con una tensión continua la frecuencia de oscilador y éste funcione como un VCO (Oscilador Controlado por Tensión), como para generar una señal modulada en FM (práctica 3).

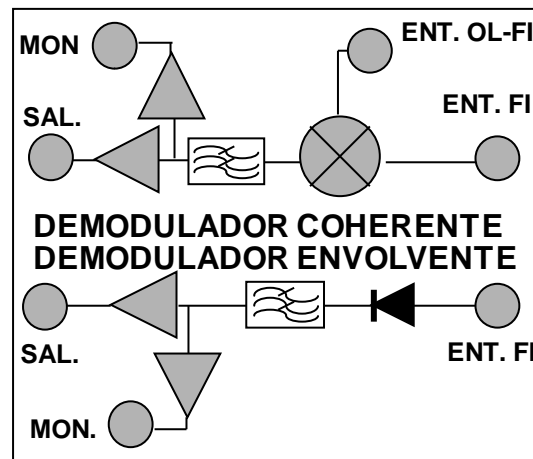
2.3. PLACA AMPLIFICADOR FI-TX

Esta placa contiene un amplificador basado en un MOSFET de doble puerta sirviendo la segunda de ellas para introducir una tensión DC que permite ajustar la ganancia del mismo (es variable con el mando de ganancia). A la entrada y salida existen unos circuitos sintonizados a la frecuencia de trabajo de 10.8MHz . Su ganancia máxima es de unos 15dB y tiene un ancho de banda de unos 200kHz . La puerta **MONITOR** presenta una atenuación de 10dB con respecto a la puerta principal de **SALIDA**.



2.4. PLACA CON DEMODULADOR COHERENTE Y DE ENVOLVENTE

Esta placa contiene dos circuitos: un demodulador de envolvente y otro coherente. El primero servirá para la demodulación de una señal AM y el segundo para la demodulación de señales BLU y DBL.

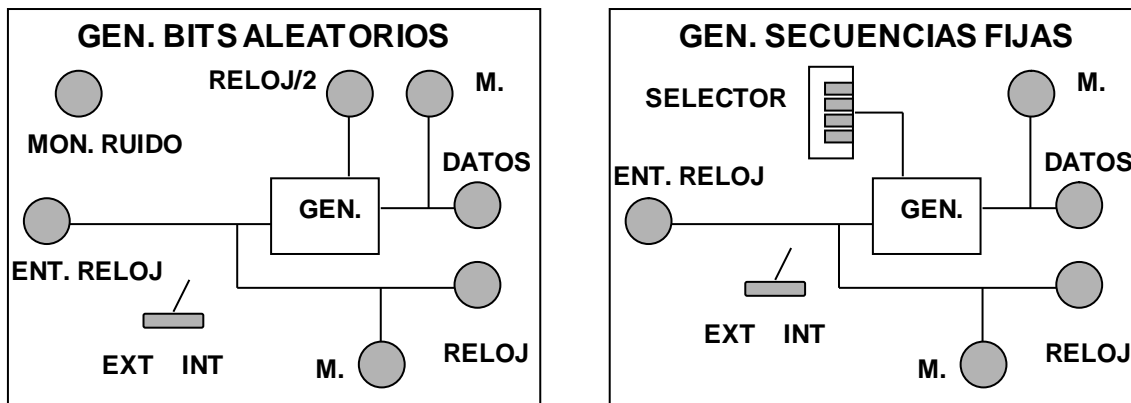


El circuito demodulador de envolvente, tal como se ha explicado en el apartado 1.1.2, consta de un diodo rectificador, seguido de un filtro y un amplificador.

El circuito demodulador coherente consta de un multiplicador, realizado mediante un puente de diodos (similar al que se utiliza para la modulación), seguido de un filtro paso bajo y un amplificador de baja frecuencia para elevar el nivel de la señal. Contiene una entrada para la señal de OL del oscilador local.

2.5. MODULACIONES DIGITALES. Banda Base-Transmisión.

La generación de datos se puede realizar con un **Generador de Bits Aleatorios** o mediante un **Generador de Secuencias** programable.

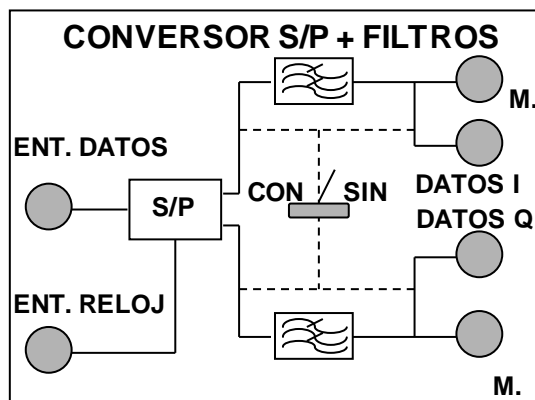


Se utilizará básicamente la primera posibilidad. Ambas placas disponen de un reloj interno fijo de 64 KHz y una entrada de reloj externa (señal TTL) que se activará situando el conmutador correspondiente en la posición EXT. Normalmente se trabajará en modo EXT.

También disponen de una salida de reloj para sincronizar el convertidor S/P al que irán normalmente conectadas y otra salida para monitorizar los datos generados.

2.6. PLACA CONVERTOR S/P

Separa la trama de bits generada en los generadores de bits con un régimen binario determinado V_b (fijado por el reloj interno o externo) en dos subtramas de régimen binario $V_T = V_b/2$: **DATOS I (DATOS Q)**.



Existe la posibilidad de hacer pasar cada una de las subtramas por un filtro de datos (Conmutador **ON** del **Convertor S/P + Filtros**) que limita el ancho de banda de la señal de banda base. **Las salidas** de datos **DATOS I (DATOS Q)** son señales bipolares (valor medio nulo) y, por tanto, **no son válidas para modulación ASK**.

Modulación.

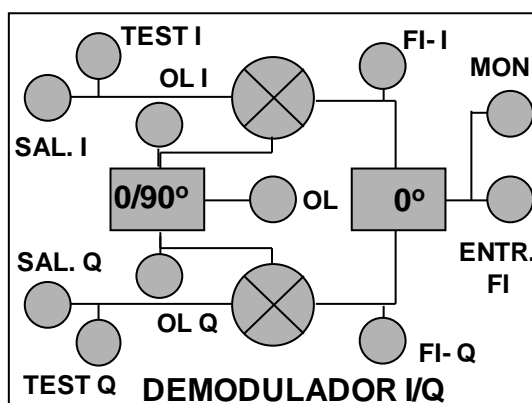
Como circuito de modulación se utiliza un **Modulador I-Q**, o modulador universal, que es útil para ASK, BPSK y QPSK. En caso de que exista una señal unipolar en una de las entradas se generará una modulación ASK, si la señal es bipolar se generará BPSK. Si existen señales bipolares en cada una de sus entradas, la modulación será QPSK.

Radiofrecuencia.

En la presente práctica sólo se considerarán los amplificadores de frecuencia intermedia, tanto en transmisión como en recepción.

2.7. PLACA DEMODULADOR I&Q.

Es un circuito igual al modulador I-Q, donde se han intercambiado las entradas y salidas: **Demodulador I-Q**. La entrada de FI se divide en dos partes iguales que atacan a dos demoduladores doblemente balanceados en cuadratura. Las salidas de estos son las señales I/Q en banda base.

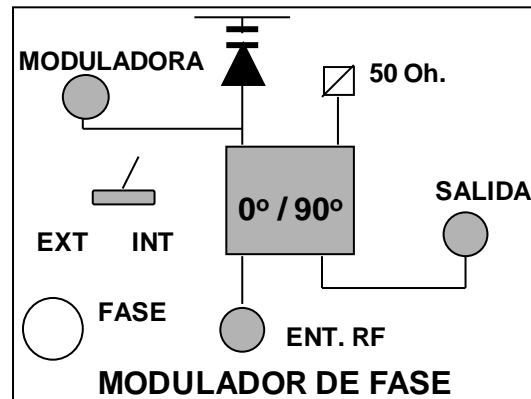


Requiere de la señal de oscilador local para su funcionamiento (demodulador coherente). En el caso de que sea posible la demodulación no coherente, modulación ASK, el sistema receptor no necesitará recuperar la portadora: la salida del **Amplificador de FI** de recepción atacará la entrada del **Demodulador de Envoltente**.

2.8. PLACA MODULADOR DE FASE.

La placa consta básicamente de un híbrido en cuadratura, por una de cuyas entradas se introduce la señal moduladora y por la otra se extrae la señal modulada. Las dos puertas de salida se cargan, respectivamente, con 50 Ohm y una capacidad C variable (un diodo varactor polarizado en inversa). Presenta, por tanto, una impedancia reactiva que puede variarse dependiendo de la tensión aplicada al diodo. Ésta puede ser continua, y puede variarse con el

potenciómetro que contiene la placa, o bien, puede ser una señal moduladora superpuesta a una continua que se aplicará a la entrada de modulación. La capacidad variará según esta señal y por tanto también la fase de la señal de salida.



El conjunto oscilador local de FI y el modulador de fase representan *una especie de recuperador de portadora*: la fase del oscilador local se ajusta con un mando de la placa del modulador de fase para conseguir la coherencia necesaria para las demodulaciones digitales de más de un estado.

3. MONTAJES Y MEDIDAS EN EL LABORATORIO

Material y equipo necesario:

<ul style="list-style-type: none"> • Osciloscopio. • Analizador de espectros • Generador de funciones. • Frecuencímetro. • Cables RCA-RCA • Cables BNC • Cargas de 50 ohm. 	<p>Placas de los siguientes circuitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Placa Oscilador Local FI. • Placa Modulador I-Q. • Placa Amplificador FI-Tx. • Placa Amplificador FI-Rx. • Placa Modulador de fase. • Placa Demodulador Coherente y de Envolvente. • Placa generador de datos aleatorios • Placa conversor SP + filtros • Placa demodulador I&Q
---	--

El bastidor se conecta directamente a la red y la alimentación de la misma se consigue accionando el conmutador de la parte superior. **En los puestos existe también una variedad de transiciones que permiten utilizar los cables BNC para llevar señales externas a la entrada de las distintas placas (conectorizadas en RCA) y viceversa. Es aconsejable elegir los distintos cables de conexionado interplacas de la longitud adecuada para que no se ejerza tensión excesiva sobre los conectores.**

Las placas de FI y RF (señales de MHz) de las distintas prácticas están diseñadas para presentar 50 Ohms en sus puertas de entrada y ser cargadas con 50 Ohms en sus puertas de salida. En función del aparato de medida que se utilice esta carga de 50 Ohms puede ser necesaria o no (el analizador de espectros, por ejemplo, presenta 50 Ohms a su entrada mientras que un osciloscopio presenta una impedancia mucho más elevada por lo que poniendo 50 Ohms externos en paralelo con su entrada se simula el efecto de carga necesario para el circuito).

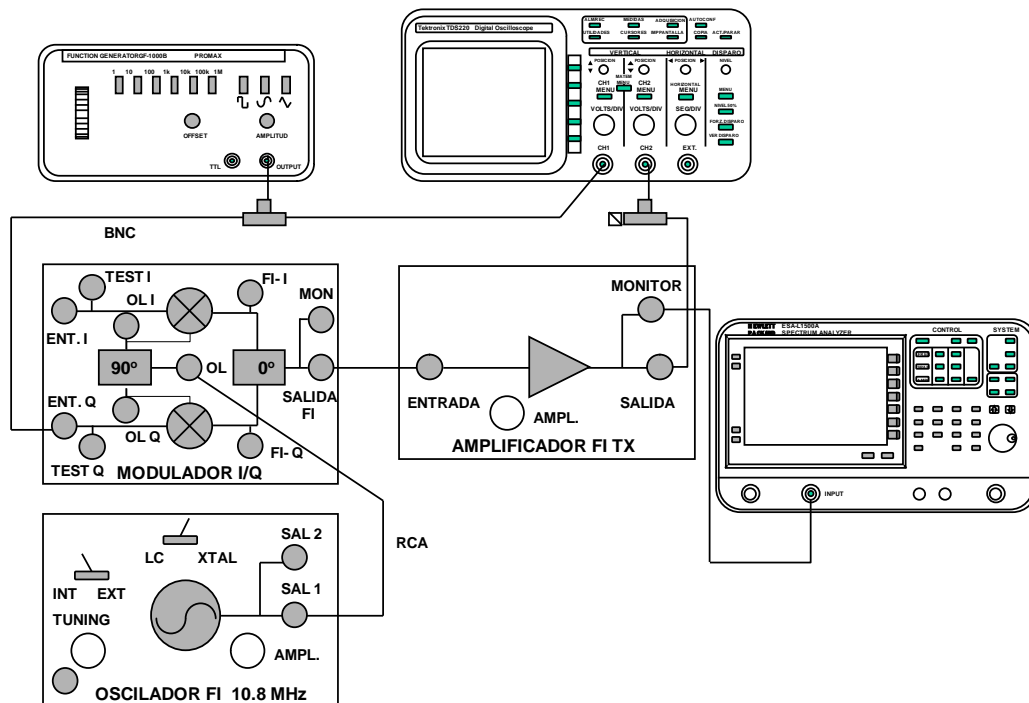
Por otra parte, las figuras que se presentan a lo largo del texto deben servir tan sólo de guía puesto que las conexiones y posición de los distintos interruptores se especifican en el propio texto.

3.1. EXPERIMENTO nº 1. Obtención de una señal modulada en amplitud (AM)

Genere con la placa **Oscilador Local FI** una señal de amplitud máxima y una frecuencia de 10.82MHz. Los interruptores de la citada placa deben estar en las posiciones **INT** y **XTAL**.

Obtenga con el generador de funciones una señal con una amplitud de aprox. 4.5Vpp. y una frecuencia de 30KHz. La señal debe tener un nivel de continua de -4.5V aproximadamente. Mida ambos niveles con el osciloscopio (**recuerde, en lo siguiente, que cuando se pide obtener un cierto nivel del generador de funciones la medida debe hacerla en vacío, cargando el generador de funciones exclusivamente con el osciloscopio y desconectándolo de cualquier placa**).

Una vez ajustados los niveles de portadora y moduladora, realice, tal como se indica en la figura, las siguientes conexiones que permiten visualizar las señales moduladora y modulada en el osciloscopio (recuerde sincronizar éste con el CH1) y ésta última también en el analizador de espectros. Observe que la señal de salida del amplificador de FI está “cargada” con 50 ohmios mediante una T BNC situada en el propio osciloscopio. La salida MONITOR no requiere de esta carga ya que el analizador de espectros tiene una impedancia de entrada de 50 Ohms.

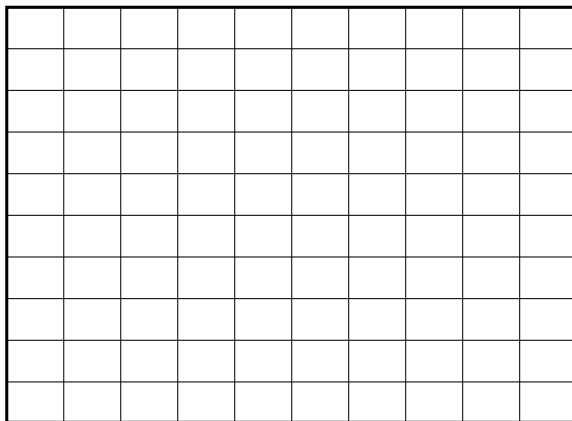


- El generador de funciones al conector Q de la placa **Modulador IQ** (puede observar en el

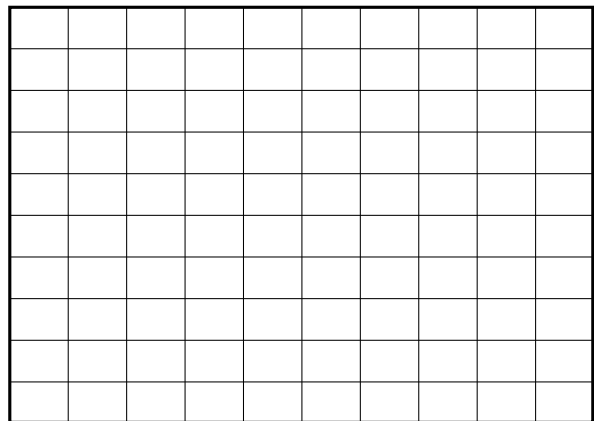
osciloscopio el efecto de “carga” del circuito sobre el generador que produce un descenso del nivel de la señal moduladora).

- El conector **SAL1** de la placa **Oscilador Local FI** al conector **OL** de la placa **Modulador IQ**.
- La salida **FI** de la placa **Modulador IQ** al conector **ENTRADA FI** de la placa **AMPLIFICADOR FI-Tx**.
- El conector **MONITOR** de la placa **AMPLIFICADOR FI-Tx** al analizador de espectros.
- El conector **SALIDA FI** de la placa **AMPLIFICADOR FI-Tx** al CH2 del osciloscopio.

Visualice la señal modulada en el dominio del tiempo y de la frecuencia. **Realice una fotografía** de ambas representaciones:



AM (Osciloscopio)



AM (A. E.)

Medida del índice de modulación

El índice de modulación para una portadora modulada por un tono viene dado por:

$$m = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}$$

donde E_{max} y E_{min} son, respectivamente, las amplitudes máxima y mínima de la envolvente de la señal modulada (osciloscopio).

Índice de modulación: m=

Verifique esta última medida observando los niveles relativos de portadora y bandas laterales en el analizador de espectros (centrado en 10.82 MHz y con un SPAN de 400 KHz y RBW de 3 KHz). Utilice la expresión:

$$20 \log m = 6dB - \Delta$$

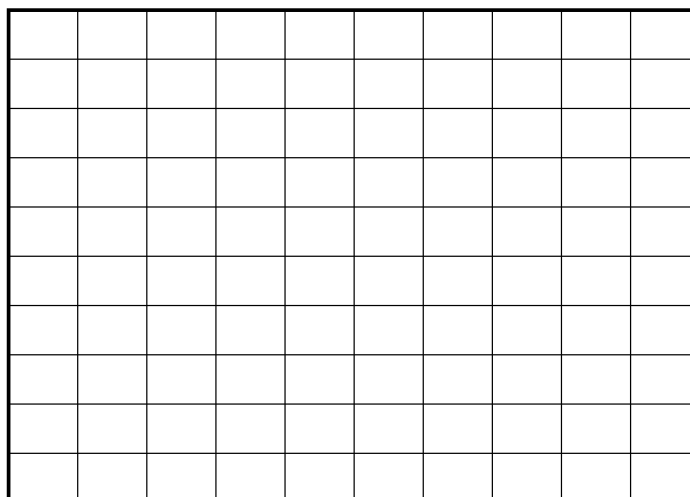
$\Delta =$ dB; Índice de modulación medido en el A.E.: m=
--

Observe en el osciloscopio que la envolvente de la señal modulada es precisamente la señal moduladora. Superponga, para ello, las señales presentes en ambos canales del osciloscopio y sincronice con el canal 1 correspondiente a la señal moduladora. ¿A qué es debido que estén en contrafase?.

Observe que variando el nivel de continua de la señal moduladora mediante el mando **DC OFFSET** del generador de funciones se puede modificar el Índice de modulación (al variar el nivel de portadora) y también variando el nivel de alterna de la señal moduladora (en este caso se modifica el nivel de las bandas laterales). Compruebe, apunte y comente en este segundo caso la variación de nivel de los productos de intermodulación.

Amplitud señal moduladora (Vpp)	Nivel (dBm) de la componente $F_{FI}+F_m$	Nivel (dBm) de la componente $F_{FI}+2F_m$
4		
5		
6		

Module ahora con una señal cuadrada (pulse el botón correspondiente del generador de funciones) y observe el espectro. Compruebe que las bandas laterales están ahora formadas por los armónicos impares de la señal moduladora (los armónicos pares son teóricamente nulos). Realice una fotografía del espectro obtenido.



Espectro AM con señal moduladora cuadrada

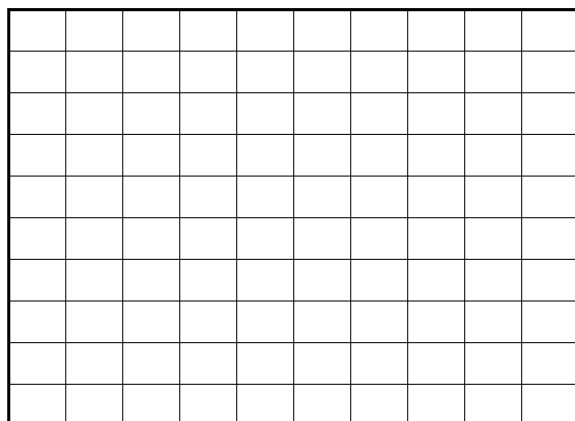
Frecuencia moduladora utilizada: KHz

Vuelva o ajustar el generador de funciones para obtener una señal sinusoidal de 30 KHz y 4.5 Vpp. No retire los cables del montaje pues servirán para el apartado siguiente.

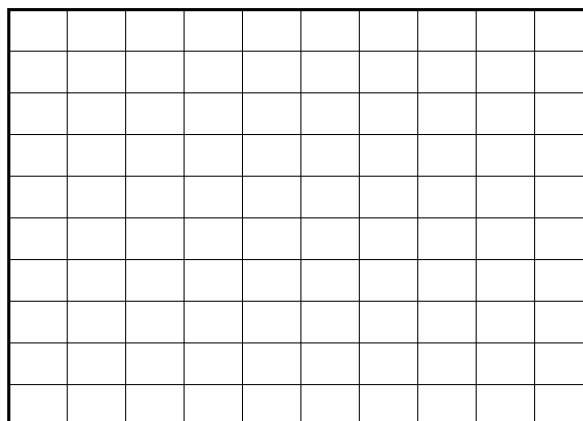
3.2. EXPERIMENTO nº 2. Obtención de una señal modulada en DBL

Lleve la señal de salida del generador de funciones a la entrada TEST I (ó TEST Q) del **Modulador IQ**. De esta manera nos aseguramos que el nivel de DC del generador de funciones queda eliminado.

Mantenga el montaje del experimento anterior y visualice y realice fotografías de la señal modulada en el dominio del tiempo (recuerde sincronizar el osciloscopio con la señal moduladora) y de la frecuencia. Si los lóbulos de la señal modulada (dominio del tiempo) no fueran exactamente iguales (señal de un buen rechazo de portadora), solicite al profesor que ajuste el modulador.



DBL (Osciloscopio)



DBL (A. E.)

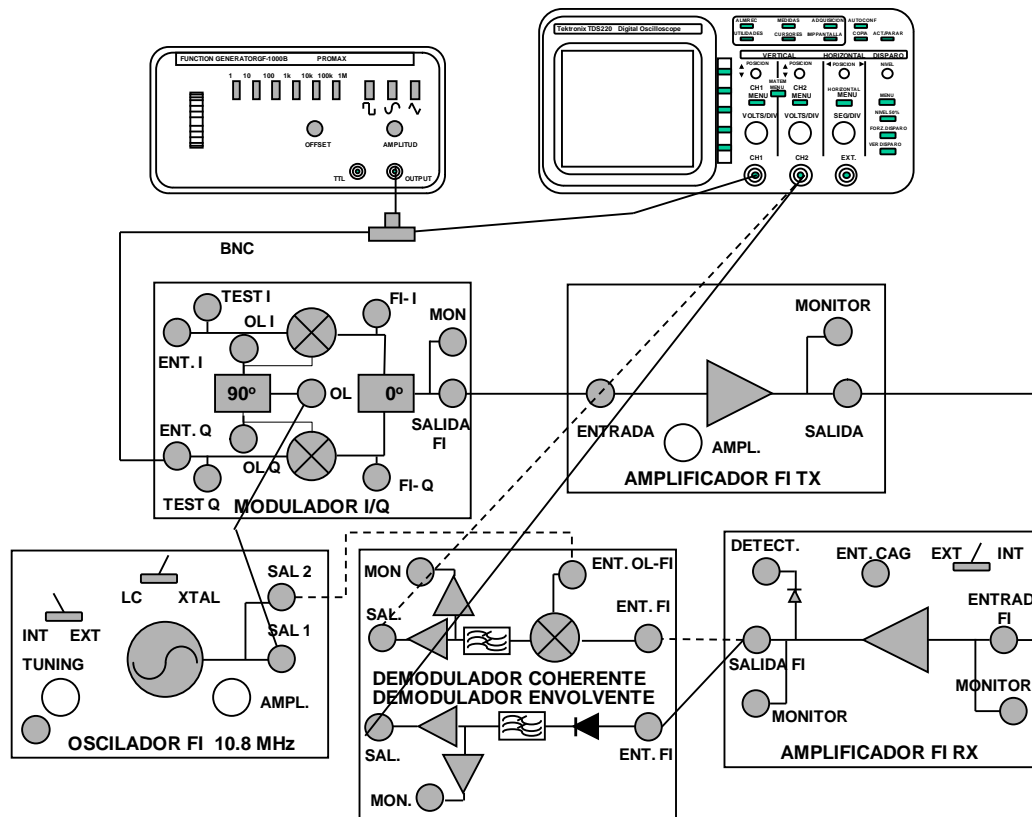
Asocie, en el dominio de la frecuencia, cada una de las deltas con un producto de intermodulación y mida el rechazo del modulador a la portadora (relación en dB entre los niveles de las bandas laterales y el de portadora):

Rechazo de portadora: R = dB

3.3. EXPERIMENTO nº 3. Demodulación de las señales AM y DBL

Realice, tal como se indica en la figura, las siguientes conexiones (línea continua):

- El generador de funciones (señal sinusoidal de 30 KHz + DC offset) al conector **Q** de la placa **Modulador IQ**.
- La salida **SAL1** de la placa **Oscilador local FI** al conector **OL** de la placa **Modulador IQ**. Los conmutadores de la placa deben estar en la posición **INT** y **XTAL**.
- La salida **FI** de la placa **Modulador IQ** a la entrada FI de la placa **Amplificador FI-Tx**, y la salida de ésta a la entrada de la placa **Amplificador FI-Rx**. El conmutador de ésta debe estar en la posición **INT**. El objeto de utilizar esta última placa es para obtener un nivel de señal suficiente para atacar el demodulador.
- Conecte la salida **SAL FI** de la placa **Amplificador FI-Rx** a la entrada **ENT FI** del demodulador de envoltorio y la salida de éste al osciloscopio.

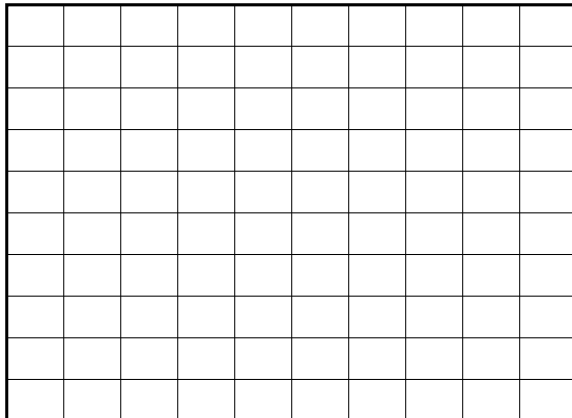


Intente visualizar en el osciloscopio la señal moduladora y la señal demodulada. Para ello, puede ser necesario ajustar la ganancia del amplificador FI-Tx y/o el nivel de la señal moduladora, para que el nivel de señal que ataca al demodulador sea el adecuado. (Niveles orientativos: MODULADORA: amplitud de +3,5Vpp y un nivel de continua de -9,5V (medido en vacío); SEÑAL DE FI A LA ENTRADA DEL DEMODULADOR (SALIDA DEL AMPLIFICADOR FI Rx): 600 mVpp sobre 50 Ohm). El índice de modulación, así como los niveles de señal involucrados en los distintos módulos son de mucha importancia en este tipo de modulación.

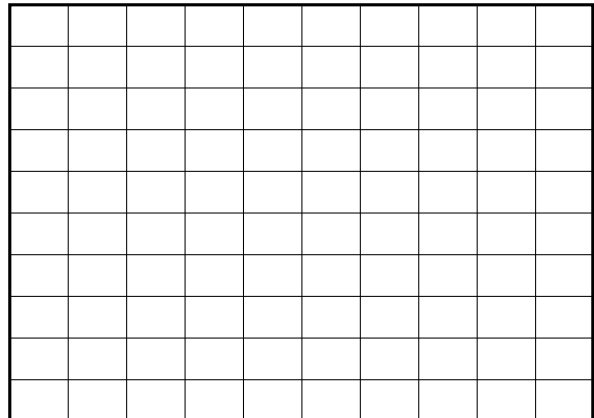
Para la demodulación de una señal **DBL** debe utilizarse el mismo montaje que para la demodulación de una señal **AM**, salvo que debe utilizarse el Demodulador Coherente (líneas discontinuas). Por tanto, debe conectarse la salida **SAL FI** de la placa **Amplificador FI-Rx** a la entrada **FI** del demodulador coherente (parte superior de la placa) y la salida de éste al canal 2 del osciloscopio. La señal de referencia del **OL** se obtiene conectando la salida **SAL 2** la placa **Oscilador Local FI** a la entrada **OL-FI** del demodulador coherente.

La señal DBL se obtendrá sin más que eliminar el offset del generador de funciones o utilizar las entradas desacopladas en DC de la placa moduladora. Los niveles orientativos del experimento anterior siguen siendo válidos para este, aunque las demodulaciones coherentes son mucho más robustas. Visualice las señales moduladora y demodulada en el osciloscopio y realice

fotografías de ambos resultados.



AM demodulada (Osciloscopio)

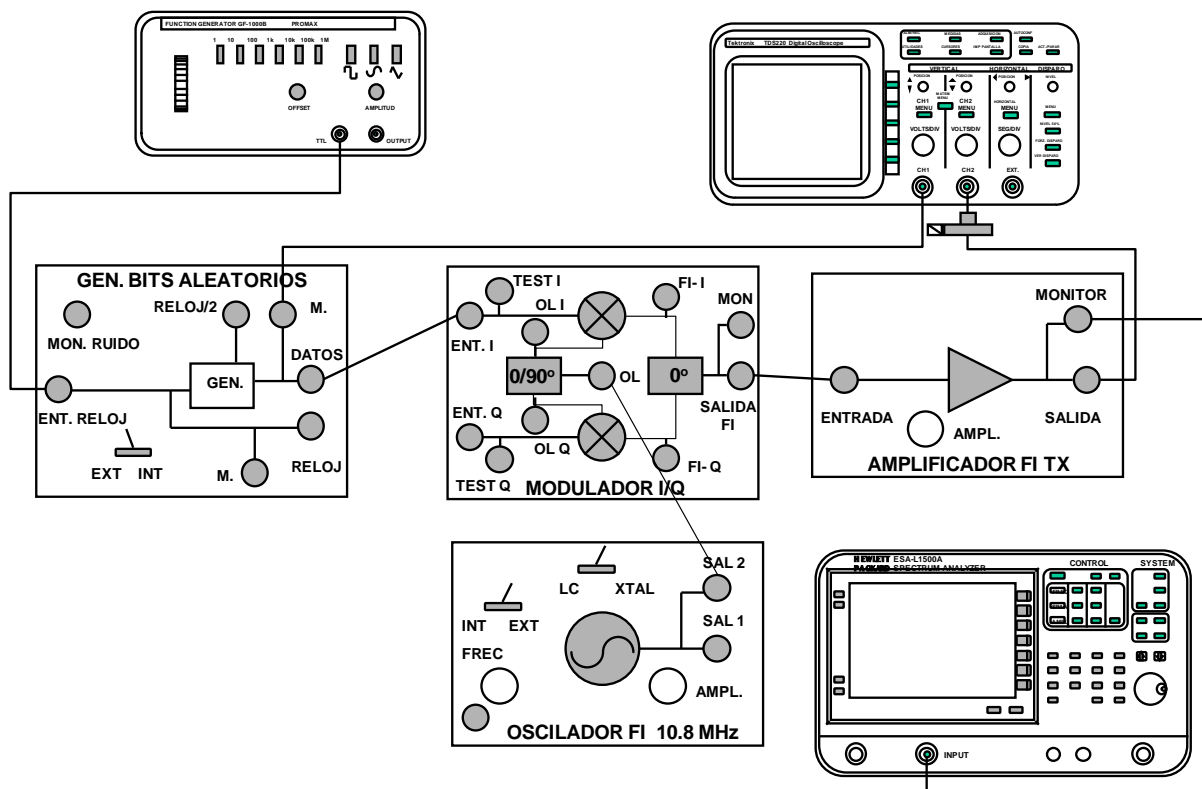


DBL demodulada (Osciloscopio)

Tanto en la demodulación AM como en la demodulación DBL podrá observar que las señales moduladora y demodulada están desfasadas y que este desfase varía con la frecuencia de la señal moduladora. Explique este fenómeno.

3.4. EXPERIMENTO nº 4. Obtención de una señal modulada en ASK

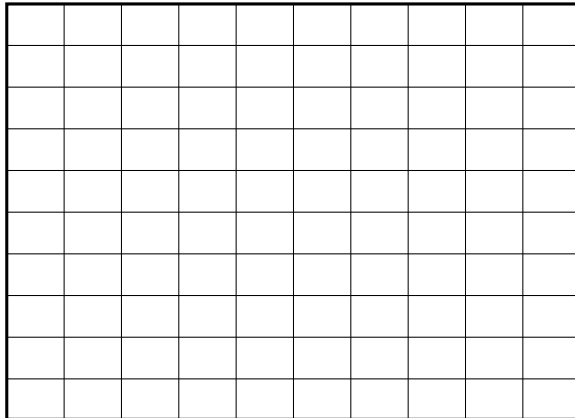
La señal ASK puede considerarse (de hecho lo es) una señal AM con un índice de modulación del 100%. La placa generadora de bits aleatorios genera datos de nivel TTL según la frecuencia de reloj seleccionada (**salida de sincronismo TTL del generador de funciones**). Por tanto aplicando estos datos a un modulador AM, de forma similar a como se hizo en apartados anteriores, se obtendrá la señal ASK. Realice el montaje de la siguiente figura y ajuste la frecuencia del generador de funciones a 20 KHz.



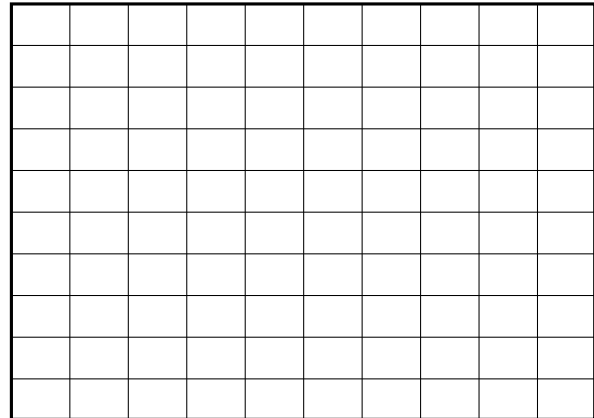
Compruebe en el osciloscopio, visualizando el canal 1, que los datos generados se corresponden con la frecuencia de reloj seleccionada (“unos” y “ceros” de duración $1/20E3$ sg). Dado que son aleatorios, no es posible sincronizar el osciloscopio para una correcta visualización, sin embargo, ésta puede conseguirse sin más que presionar el botón activar/parar del osciloscopio para ver distintas tramas. La base de tiempos debe ajustarse en consonancia con el número de datos que se quieran ver.

Si visualiza simultáneamente el canal 2 (señal modulada) observará la presencia de señal de FI cuando el dato es un “uno” y ausencia de señal de FI cuando el dato es un “cero”. Visualice también la señal modulada en el analizador de espectros (centrando correctamente la señal en

pantalla y ajustando los mandos a **RBW: 1 KHz** y **SPAN: 200 KHz**). Realice una fotografía de ambas medidas (en el caso de la señal en el osciloscopio, capture ambos canales de una trama de datos al azar activando y parando el aparato).



ASK (Osciloscopio)



ASK (A. E.)

Mida la velocidad de transmisión a partir de la anchura del lóbulo principal de la sinc:

Frecuencia seleccionada en el generador de funciones	Velocidad de transmisión medida en el analizador de espectros
20 KHz	

Mida sobre el espectro la potencia de portadora y la de las bandas laterales. Para la medida de la potencia de la portadora (Peak Search), el filtro del analizador de espectros debe de ser lo suficientemente estrecho (1 KHz) para que no integre demasiada potencia de las bandas adyacentes; lo mismo para la medida de la potencia de las bandas laterales. Sin embargo, para la medida de la potencia media, el filtro debe tener un ancho de banda mayor que el de la señal. El tiempo de barrido debe hacerse suficientemente grande (10-20 sg) para una correcta visualización de la sinc. Rellene el siguiente cuadro:

Potencia de portadora en ASK (dBm)	
Potencia media de la señal ASK (dBm)	
Potencia de las bandas laterales en ASK (dBm). S_0 es la potencia del máximo de la sinc (excluida la portadora)	
$P_{BL} = S_0 - 10 \cdot \log(T \cdot RBW)$	

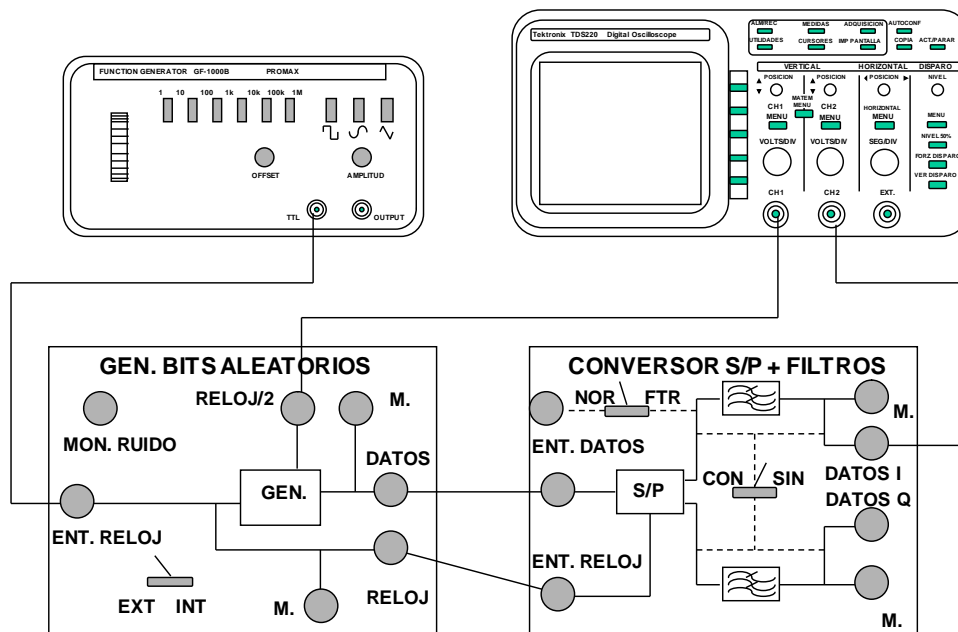
Modifique la frecuencia de los datos y visualice como se modifica el espectro de la señal.

3.5. EXPERIMENTO 5. Diagramas de Ojo.

En las modulaciones BPSK y QPSK que veremos a continuación, los datos generados de manera aleatoria se harán pasar por un filtro que limite el ancho de banda transmitido, a diferencia de lo realizado en el apartado anterior (la señal de datos atacaba directamente al modulador y la señal de salida del amplificador de FI era la sinc en su totalidad).

En este apartado se quiere observar la deformación que sufren las señales en banda base por la utilización de los filtros necesarios para limitar el espectro de transmisión. Dicha deformación se traduce en Interferencia entre Símbolos. A partir del diagrama de ojo obtenido se determinará la máxima frecuencia de transmisión usando los filtros implementados en la placa “convertor serie/paralelo”.

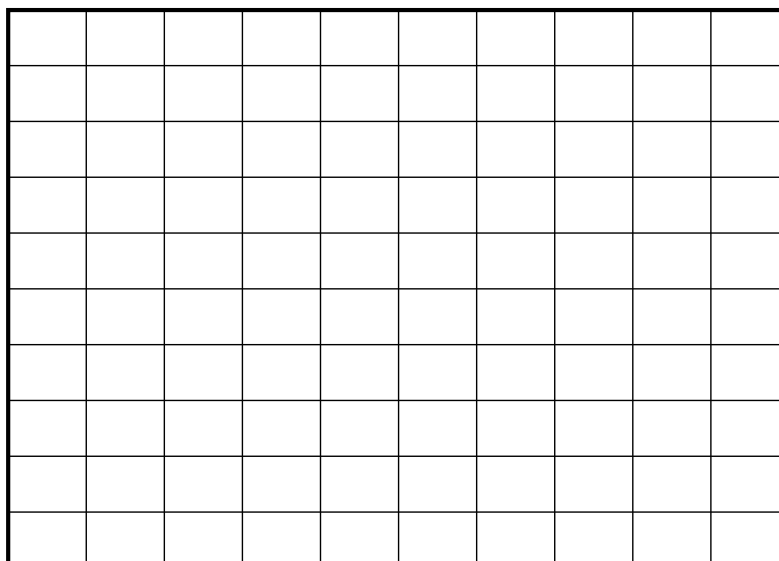
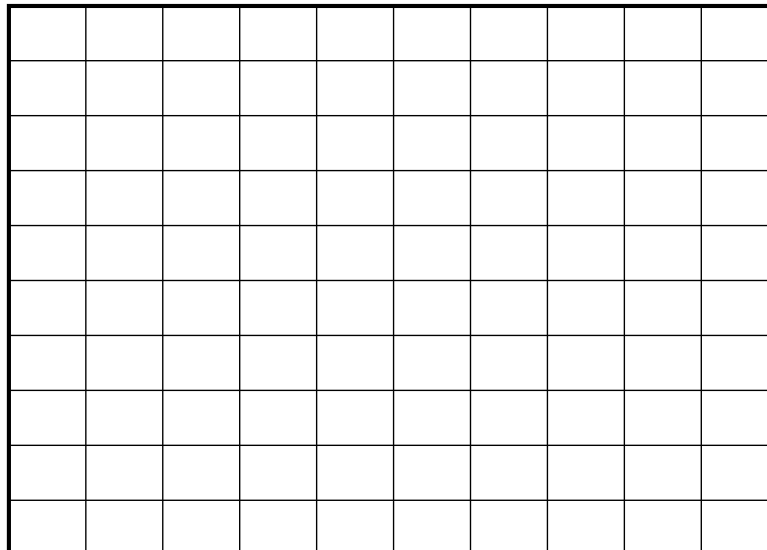
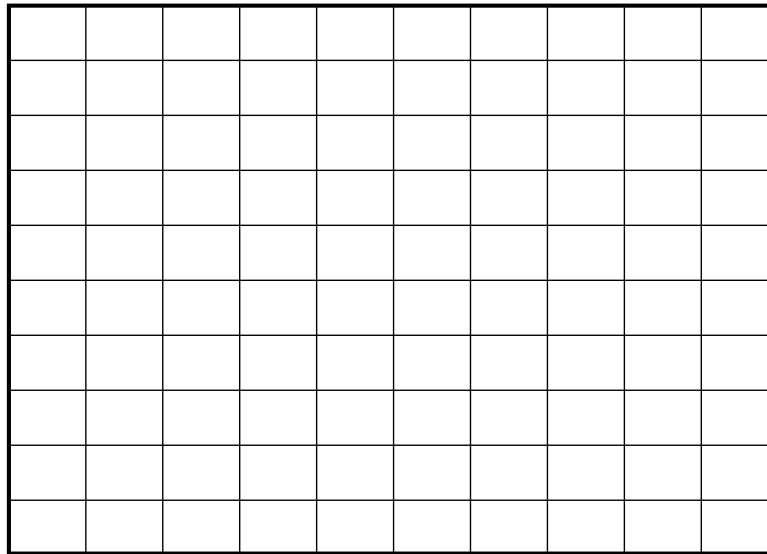
Realice el montaje de la siguiente figura:



Seleccione una frecuencia de reloj (salida TTL del generador de funciones) de 25 KHz. Coloque el interruptor del generador de bits aleatorios en la posición **EXT** (sincronización exterior) y el interruptor en la posición **NOR** en el convertor S/P. Lleve la salida **DATOS I (DATOS Q)** a uno de los canales del osciloscopio y utilice la salida **RELOJ/2** del generador de bits aleatorios para **sincronizar** la traza en el osciloscopio (debe ser de frecuencia mitad a la que se generan los datos puesto que a continuación éstos van a pasar por el convertor S/P). En la pantalla aparecerá el diagrama de ojo de la señal transmitida por el canal I (Q). Utilice para ello la opción **Persistencia** del menú **Display**. Compruebe el efecto de utilizar el filtro (Interruptor **CON** del convertor Serie-Paralelo). Realice una fotografía del diagrama de ojo con el filtro de datos.



Repita esta misma operación para frecuencias de reloj de 50 KHz y 75 KHz. Compare las tres gráficas y comente los resultados.



Aumente la frecuencia de reloj partiendo de 25 KHz hasta hallar la máxima velocidad de transmisión posible en una modulación **I-Q** sin Interferencia Entre Símbolos (frecuencia a partir de la cual ya no se conserva la abertura máxima del diagrama de ojo). Anote la respuesta.

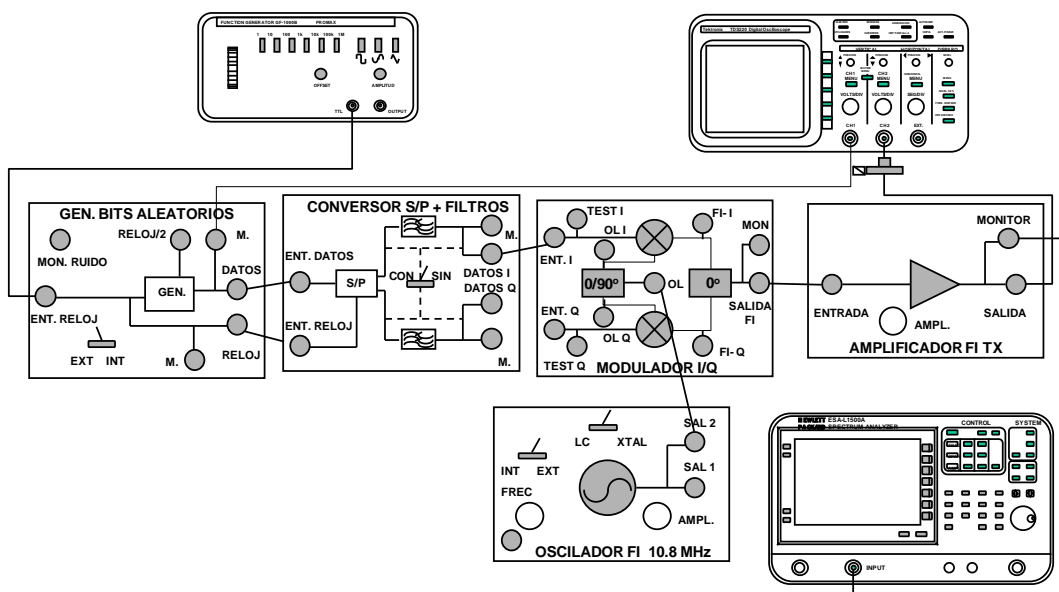
VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN MÁXIMA = Kbits/s

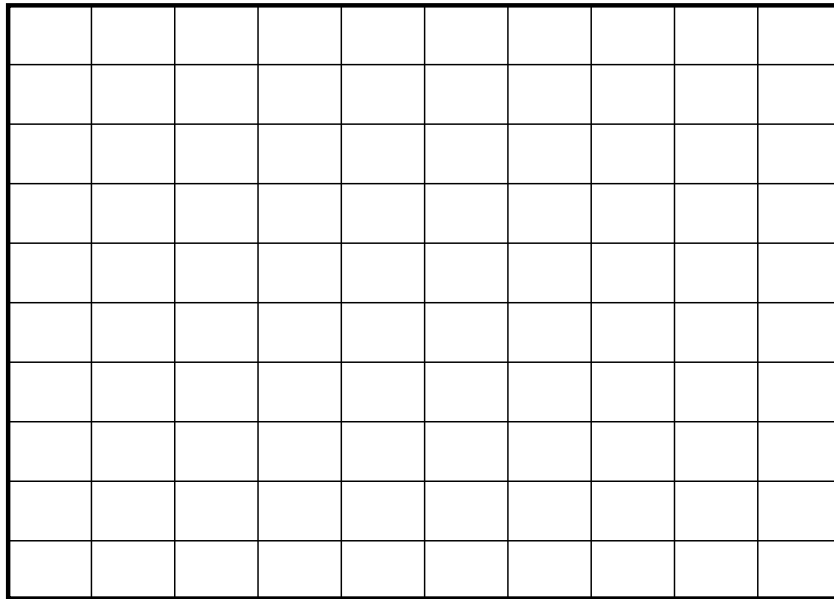
Recuerde **que el régimen binario se divide por dos en el convertor serie paralelo**. Teniendo en cuenta este dato y la anterior medida, ¿cuál es el ancho de banda del filtro de datos, suponiendo que este es un filtro ideal de Nyquist?

ANCHO DE BANDA= KHz.

3.6. EXPERIMENTO 6. Modulación BPSK

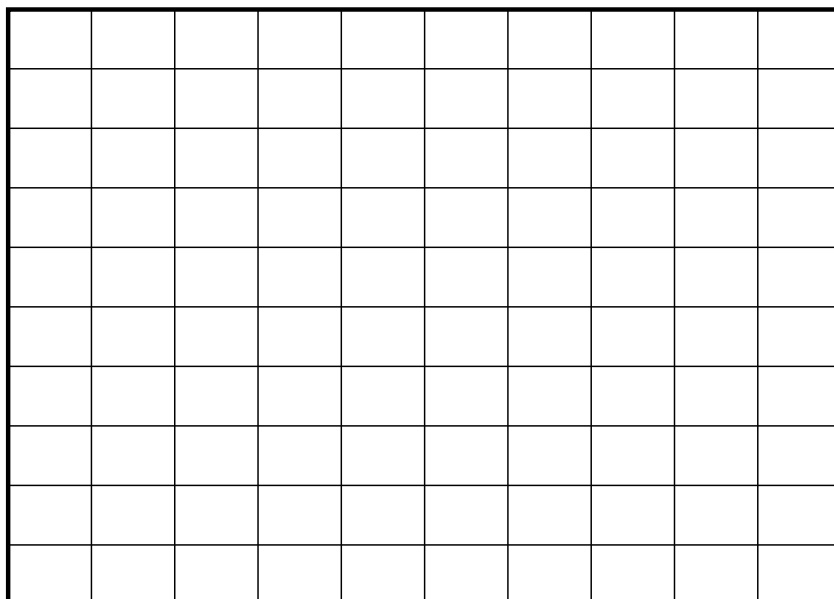
Genere una señal BPSK con $V_T = 25$ Kbits/s (frecuencia de reloj 50 KHz, recuerde la división por dos en el régimen binario en el convertor serie-paralelo). Para ello conecte la salida del generador de bits aleatorios a la entrada del convertor serie-paralelo. La salida de este se debe conectar a una de las entradas **I (Q)** del modulador I-Q y el filtro debe de estar desactivado (**OFF**). Observe el espectro en el Analizador de Espectros y realice una fotografía del mismo (RBW=1KHz, SPAN=200 KHz).





1.-¿Cuál es la diferencia fundamental con el espectro de una modulación ASK?

2.-Observe el espectro con filtro y sin él (Interruptor **FILTRO ON/OFF** del Conversor Serie-Paralelo+Filtro). Realice una fotografía (filtro ON) y mida el ancho de banda a 20 dB respecto al máximo de ambos espectros. Anote los resultados.



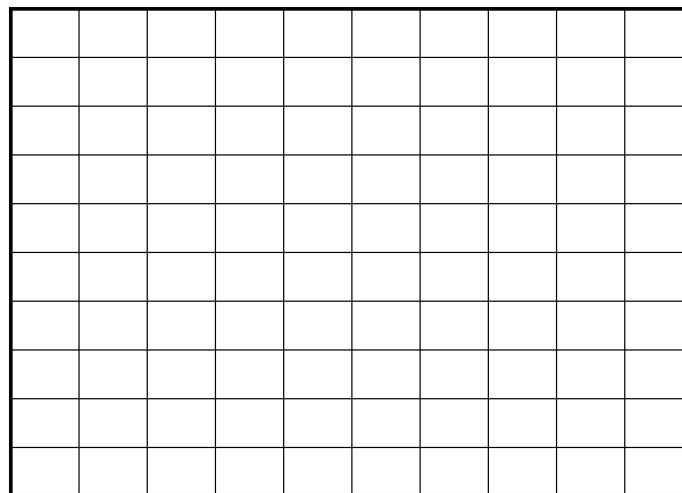
Ancho de Banda a 20 dB sin Filtro	
Ancho de Banda a 20 dB con Filtro	

¿Cambia la posición de los nulos en los dos casos contemplados anteriormente?. ¿Por qué?

3.7. EXPERIMENTO 7. Modulaci3n QPSK

La generaci3n de la se1al QPSK se basa en utilizar las dos salidas de datos del conversor serie-paralelo y los dos moduladores en cuadratura de la placa Modulador I-Q. Los montajes son similares a los del apartado anterior utilizando las dos salidas del conversor serie/paralelo y las dos entradas del modulador I&Q. En este caso, la frecuencia de reloj usada en el generador de datos es tambi3n la velocidad binaria (bit/sg).

1.- Observe la forma y anchura del espectro para una frecuencia de reloj de 50 KHz. Realice una fotograf1a del espectro de la se1al a la salida del modulador I-Q. Compare con lo obtenido para BPSK con el mismo reloj (basta para ello que desconecte una de las dos entradas al modulador).



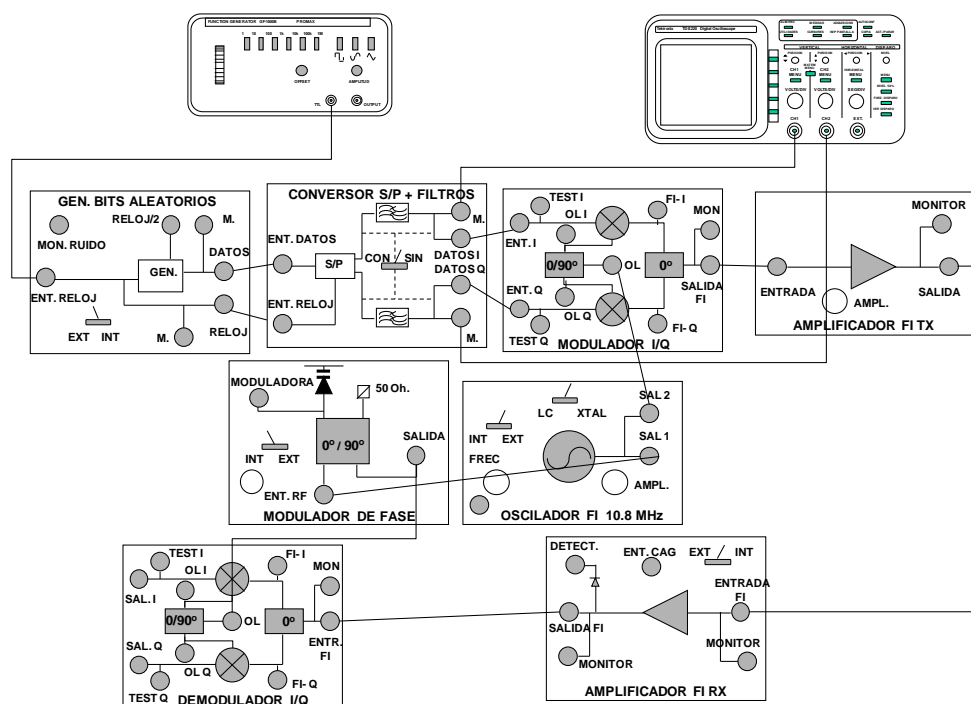
Ancho de Banda entre nulos de la se1al BPSK	
Ancho de Banda entre nulos de la se1al QPSK	

¿Qué cambia en ambos casos?

No retire los cables del montaje pues servirán para el apartado siguiente.

3.8. EXPERIMENTO 8. Constelación QPSK. Efecto del canal.

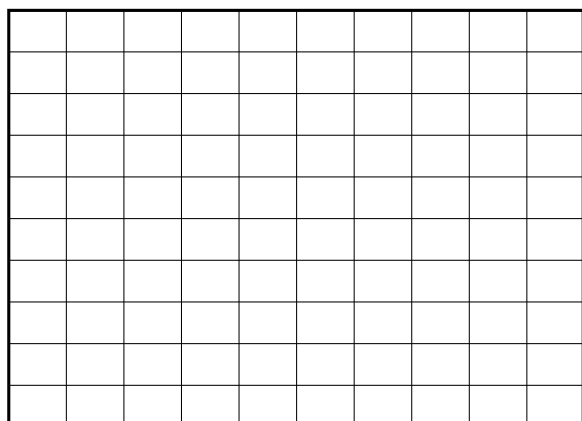
A continuación se va a comprobar el efecto de los distintos subsistemas en la señal, desde que es generada (banda base transmisión) hasta que es demodulada, salida del demodulador I&Q. Realice el montaje de la figura (reutilizando el anterior, simplemente hay que conectar la salida del amplificador de FI TX a la entrada del amplificador FI RX y la salida de éste al demodulador I&Q). La señal de oscilador local en recepción será la misma usada para el modulador (salida no usada del oscilador de FI) cuya fase variaremos a voluntad con el potenciómetro de la placa modulador de fase (simularemos así un recuperador de portadora) antes de introducirlo en el demodulador I&Q.



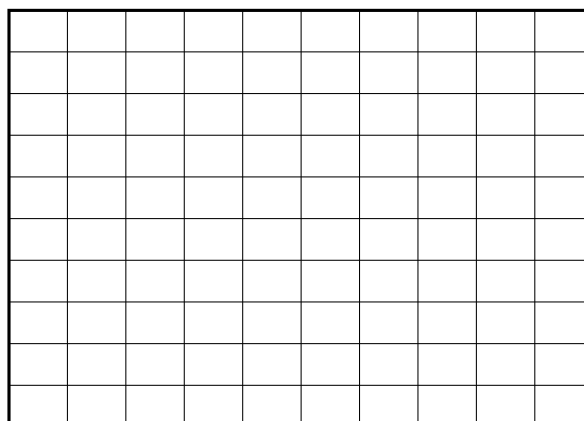
Primeramente se observará la constelación de los datos I&Q generados en el extremo transmisor llevando las salidas MONITOR (M.) de la placa conversor serie/paralelo + filtros al osciloscopio y visualizando en modo XY. Actúe sobre el interruptor para activar y desactivar el



filtro y realice fotografías de lo observado en ambos casos para una velocidad de datos de 25 kb/s.



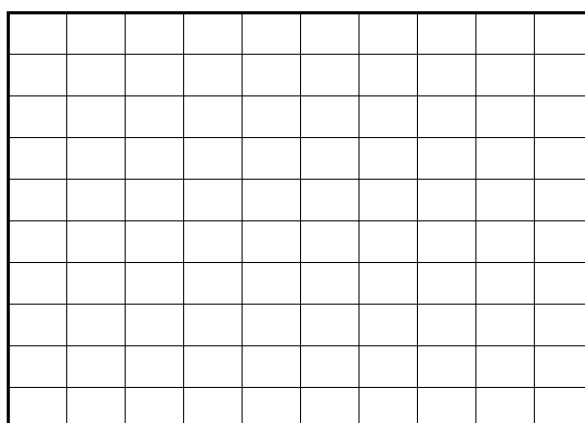
Constelación banda base TX (sin filtro)



Constelación banda base TX (con filtro)

Actúe ahora sobre la velocidad de transmisión (frecuencia del generador de funciones) y observe la deformación de la constelación al usar el filtro conforme se aumenta ésta.

Lleve ahora las salidas del Demodulador I&Q al osciloscopio para visualizar la constelación en recepción (use 25 Kb/s). Lleve la sensibilidad de ambos canales del osciloscopio al mínimo (la señal aplicada, salida del demodulador I&Q, es de muy bajo nivel). Observará que aparece girada con respecto a lo esperado y deformada con respecto a lo visto en el montaje anterior. Actúe sobre el control de fase en la placa desfasadora para llevarla a una posición simétrica de la constelación y observe el efecto de la velocidad de datos en la deformación de la constelación.

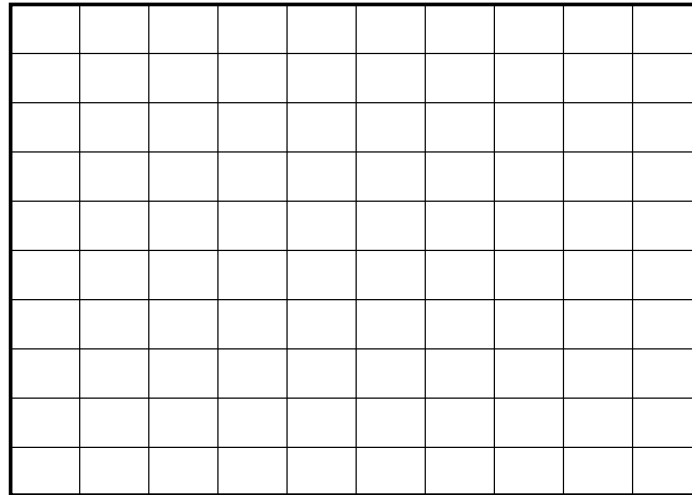


Constelación banda base RX (con filtro)

La circuitería que seguiría a este punto es simplemente un conversor paralelo/serie cuyas entradas son las salidas del demodulador I&Q y cuya salida es la trama de datos. Incorpora un comparador de umbral y un recuperador de reloj digital a partir de los datos I&Q ya digitales.

CUESTIONES:

Dibuje de forma aproximada el espectro de una señal modulada en AM por una señal cuadrada de 100 kHz y un índice de modulación del 100%. Utilice un SPAN de 2 MHz para la representación y un RBW suficientemente pequeño.



Se tiene un filtro paso bajo ideal de 50 KHz de ancho de banda. Si se coloca este filtro en las salidas de un conversor serie/paralelo, ¿qué velocidad binaria máxima puede obtenerse en una modulación QPSK que utilice las salidas filtradas como señales de banda base sin que exista interferencia entre símbolos?

Velocidad máxima (bits/sg):	
-----------------------------	--

Comente que efectos tendría sobre una demodulación BPSK y una demodulación QPSK la falta de coherencia de fase del oscilador local del receptor.

1- En el banco del laboratorio la modulación ASK se genera:

- a) Pasando una señal NRZ bipolar por un mezclador balanceado
- b) Pasando una señal NRZ unipolar por un mezclador balanceado
- c) Ninguna de las anteriores es cierta

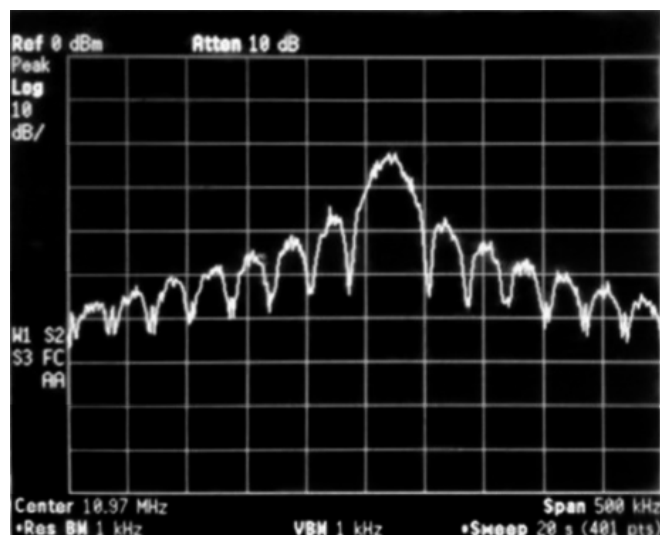
2.- El máximo de la sinc del espectro de una modulación BPSK, al aumentar la velocidad binaria en un factor de 4:

- a) Aumenta su amplitud en un factor de 6 dB
- b) Disminuye su amplitud en un factor de 6 dB
- c) Ninguna de las anteriores es cierta

3- El espectro de una señal QPSK:

- a) Es idéntico al de una señal BPSK con doble velocidad de símbolo (salvo un factor de escala en amplitud)
- b) Es idéntico al de una señal BPSK con la misma velocidad de símbolo pero los lóbulos de la sinc son el doble de anchos
- c) Las dos anteriores son falsas

4.- ¿A qué tipo de modulación corresponde la traza de la figura, si la señal moduladora es un tren de pulsos aleatorios?



Nombres, Turno y puesto de laboratorio:
