

# Trabajo opcional tema 4: modulación

Alberto Mateos Checa

I. Telecomunicación

**ÍNDICE DE CONTENIDOS:**

<b>1. Introducción.-</b>	3
<b>2. Diseño.-</b>	3
<i>2.1. Sistema completo.-</i>	3
<i>2.1. Moduladores.-</i>	3
<i>2.2. Demoduladores.-</i>	4
<b>3. Implementación.-</b>	5
3.1. Elementos de simulación.-	5
<i>3.1.1. Señales de entrada.-</i>	5
3.2. Implementación en Matlab.-	7
<b>4. Resultados.-</b>	8
<i>4.1. Frecuencia portadora 1 mhz.-</i>	8
<i>4.2. Frecuencia portadora 100 khz.-</i>	33
<b>5. Conclusiones.-</b>	57
<b>6. Modulación lineal vs modulación angular.-</b>	57
<b>Bibliografía</b>	58

## 1. INTRODUCCIÓN.-

Para la realización del estudio se van a transmitir señales senoidales, triple sinc y de pulsos moduladas mediante diferentes tipos de modulación lineal a través de un canal ruidoso. La modulaciones a realizar son FM y PA. Para ello, **no se va a hacer uso de los códigos de ejemplo que se proporcionan, debido a que los códigos para demodulación no son correctos**. En su lugar, se van a utilizar los comandos que ofrece Matlab para realizar modulaciones y demodulaciones mediante FM (fmod/fmdemod) y PM (pmmod/pmdemod). Además, para el caso de las modulaciones, el código propuesto por Lathi es similar al que integra Matlab, pues utiliza el mismo esquema.

De esta forma, las simulaciones se van a realizar tomando como valores de desviaciones en frecuencia un 5% y un 10% con respecto a la frecuencia portadora y desviaciones en fase de  $\pi/4$  y  $\pi/2$ .

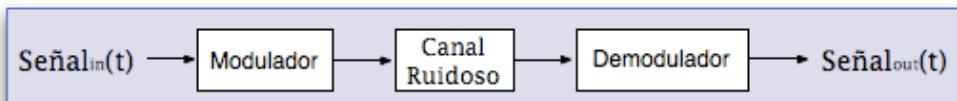
Por otro lado, el canal ruidoso se simula utilizando dos niveles de ruido diferentes, de forma que el canal proporciona dos SNRs: 0 dB y 20 dB.

Por último, se han utilizado dos amplitudes distintas para las señales mensaje (1 y 10) y dos frecuencias portadoras (100 kHz y 1 MHz).

## 2. DISEÑO.-

### 2.1. SISTEMA COMPLETO.-

Para la realización del estudio se utiliza el sistema que se muestra a continuación:

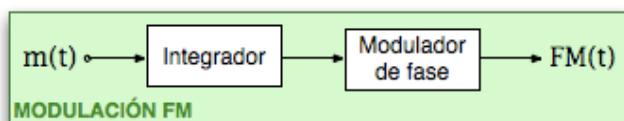


Como puede verse, las señales que se utilizan como entrada son moduladas. Posteriormente, se suma ruido blanco a la señal modulada como consecuencia de su paso por un canal ruidoso. Por último, las señales son demoduladas para poder visualizar el efecto del canal sobre la señal original.

### 2.1. MODULADORES.-

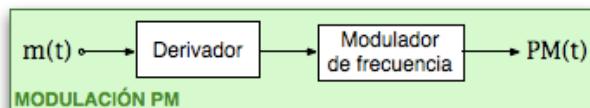
Para cada tipo de modulación se utiliza un esquema diferente. A pesar de que se utilizan las funciones propias y no las que ofrece Lathi, los esquemas utilizados para realizar las modulaciones son exactamente los mismos, siendo el código utilizado similar. A continuación se muestran todos ellos:

#### 2.1.1. FM.-



El sistema utilizado no es más que la implementación del modelo teórico. De esta forma, la señal mensaje se integra y posteriormente se utiliza dicho resultado como fase de la señal modulada.

### 2.1.2. PM.-

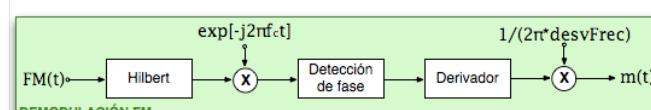


De igual forma que para la modulación FM, el modelo utilizado se ajusta a la definición teórica. Así, se deriva la señal mensaje y posteriormente, el resultado es utilizado como frecuencia instantánea de la señal modulada.

### 2.2. DEMODULADORES.-

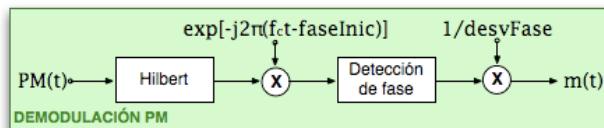
Para cada tipo de modulación se utiliza un esquema diferente, aunque en ambos casos se hace uso de la señal analítica. A continuación se muestran todos ellos:

#### 2.2.1. FM.-



La función utilizada, **fmdemod**, lo primero que se hace es obtener la señal analítica mediante la llamada a la función Hilbert. Posteriormente se multiplica la señal analítica por una exponencial compleja y se obtiene la fase de la señal resultante. A continuación se realiza la derivada y, por último, se multiplica la señal por un factor que incluye el valor de la desviación de la frecuencia. De esta forma, se obtiene la señal mensaje.

#### 2.2.2. PM.-



De nuevo se vuelve a hallar la señal analítica, se multiplica por la exponencial compleja y se obtiene la fase de la señal resultado. Por último, para obtener la señal mensaje, se divide por la desviación de fase utilizada en la modulación.

### 3. IMPLEMENTACIÓN.-

Para la realización del estudio se han implementado los sistemas anteriores mediante el uso de Matlab. Para ello se ha hecho uso de algunas de las funciones propias de Matlab así como de algunas funciones propias desarrolladas en archivos del tipo m-file, siempre siguiendo el modelo presentado anteriormente.

#### 3.1. ELEMENTOS DE SIMULACIÓN.-

A continuación se van a detallar los principales elementos que intervienen en la simulación.

##### 3.1.1. SEÑALES DE ENTRADA.-

El programa desarrollado contempla seis señales diferentes a transmitir a través del canal. La generación de todas las señales se produce mediante la llamada a la función **generacion.m**. Las formas de onda utilizadas son tres: senoidal, pulsos y triple sinc. La última de ellas, es una suma de tres señales sinc y supone una señal limitada paso baja, tal y como se apunta en los ejemplos de Lathi. Las señales senoidales y de pulsos tienen una frecuencia de 100 Hz.

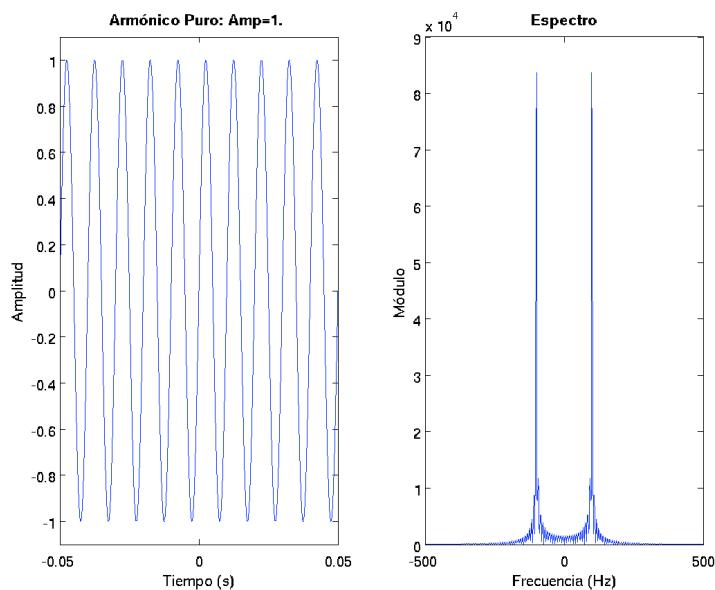
Por otro lado, se han utilizado dos niveles de amplitud diferentes para cada una de las señales. Estos niveles son 1 y 10.

Por último, es importante resaltar que, debido a que Matlab trata las señales de forma digital, para obtener unas formas de onda que sean cercanas a las de una señal analógica, la frecuencia de muestreo debe ser muy alta. En este caso se ha elegido una frecuencia de muestreo de 15 MHz. Es por ello que el tratamiento de dichas señales puede ser costoso computacionalmente.

Las señales de entrada al sistema analizadas son las siguientes (sólo se muestran las que tienen amplitud 1, puesto que las que tienen amplitud 10 son similares):

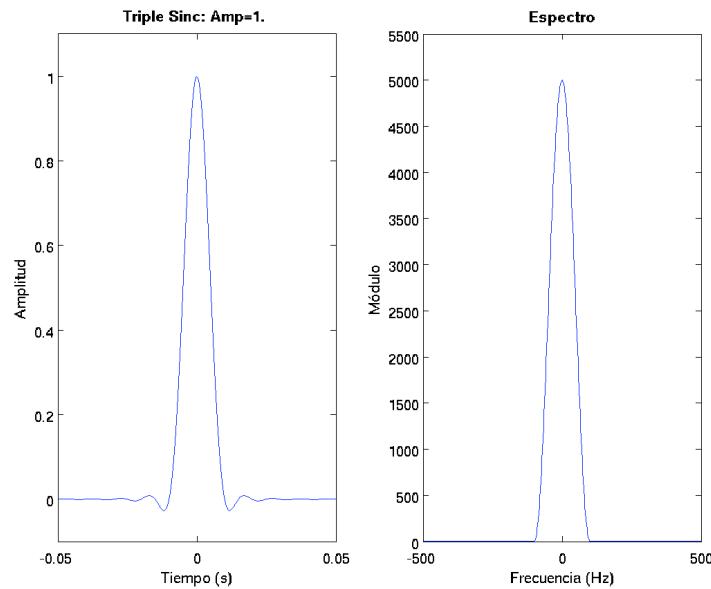
###### a. **Armónico puro.**

Se trata de una señal senoidal de frecuencia 100 Hz y desfase nulo. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



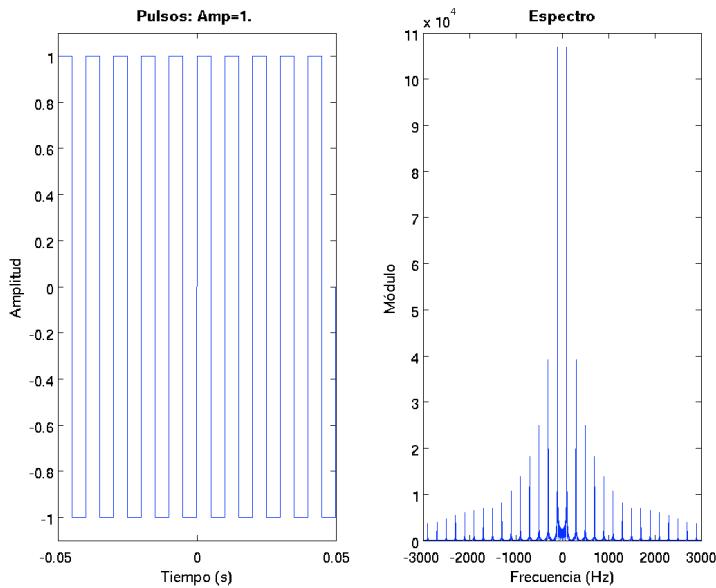
b. **Triple sinc.**

Se trata de una señal resultado de sumar tres señales sinc. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



c. **Pulsos.**

Se trata de una señal de pulsos cuadrados de frecuencia 100 Hz y desfase nulo. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



### 3.2. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB.-

La implementación de la simulación ha sido realizada mediante m-files. El archivo a ejecutar principal que realiza todas las operaciones es el **simulacion.m**, obteniéndose los resultados de la simulación en las matrices *signalsRecuperadasXX*, donde XX indica el tipo de modulación utilizada. A continuación se va a explicar qué operaciones realiza dicha m-file, que es el eje del programa desarrollado sin entrar en detalles del código (el código se adjunta claramente comentado).

Lo primero que se hace en este archivo es, tras declarar las variables de frecuencia de muestreo (*fs*), frecuencia de las señales (*fc*), frecuencia de las señales senoidales y de pulsos (*f*) y eje de tiempos (*t*), generar las señales que se van a utilizar como entrada del sistema. Para ello, se realiza una llamada a la función **generacion.m**. Esta función devuelve en la matriz *signals* las muestras de las señales por filas, es decir, cada fila de la matriz se corresponde con una señal.

Una vez que se han generado las señales, se definen los dos valores de SNR que proporciona el canal (0 y 20 dB).

Posteriormente se procede a la simulación de la transmisión a través del canal ruidoso de las señales moduladas con cada uno de los tipos de modulación que se expusieron anteriormente. Para cada tipo de modulación, la simulación se produce de forma similar.

La modulación de cada una de las señales se produce mediante las llamadas a las funciones *XXmod*, donde XX se corresponde con el tipo de modulación a utilizar. Dichas funciones están incluidas en Matlab a través del Toolbox de tratamiento de señales.

A continuación se lleva a cabo la simulación del canal. Para ello se hace uso de la función *canalRuidoso*, que no es más que una llamada a la función de Matlab *awgn*. AWGN simula el efecto de un canal ruidoso aditivo a partir de una SNR dada. Las señales resultado tras el paso por el canal son almacenadas en la matriz *signalsCanal*.

Por último, se realiza la demodulación de todas las señales que han pasado a través del canal mediante la llamada a la función *XXdemod*. El resultado se obtiene en la matriz *signalsRecuperadasXX*.

## 4. RESULTADOS.-

En este apartado se van a mostrar las formas de onda y espectros resultado de la transmisión de las señales a través del canal. Posteriormente, en el apartado de conclusiones se analizarán los resultados obtenidos.

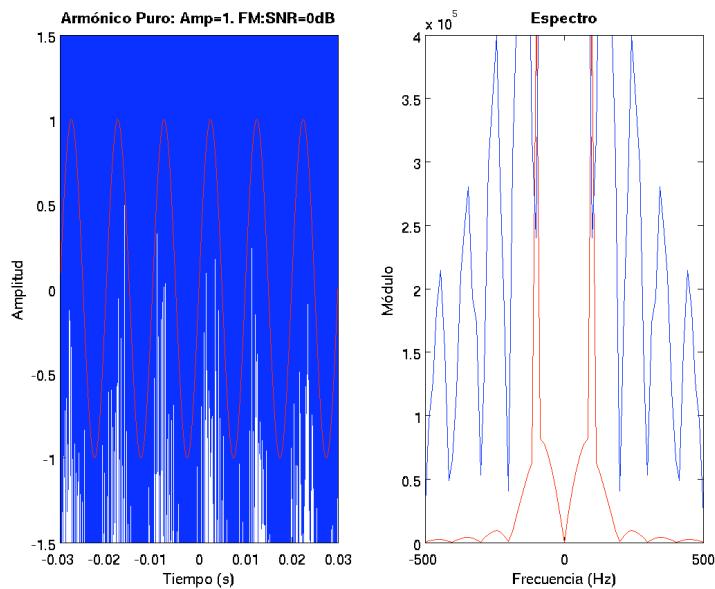
En todas las gráficas, las curvas en **azul** representan la señal obtenida a la salida del sistema, mientras que las curvas en **rojo** representan la señal original.

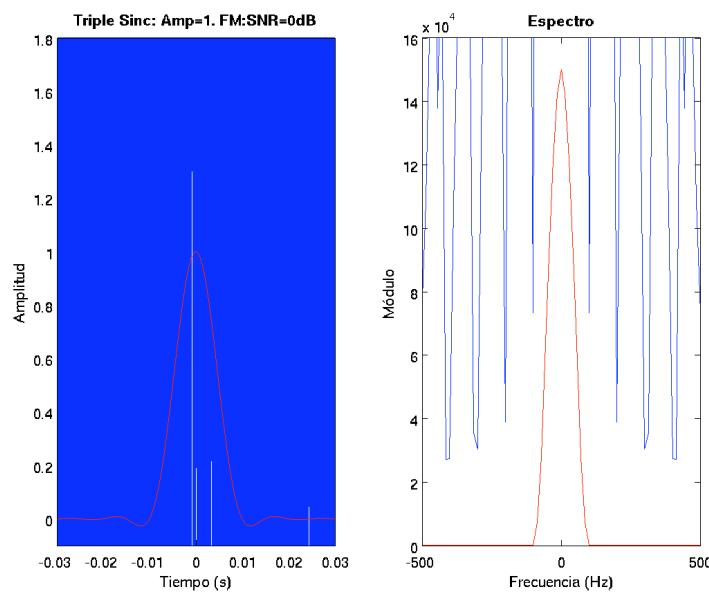
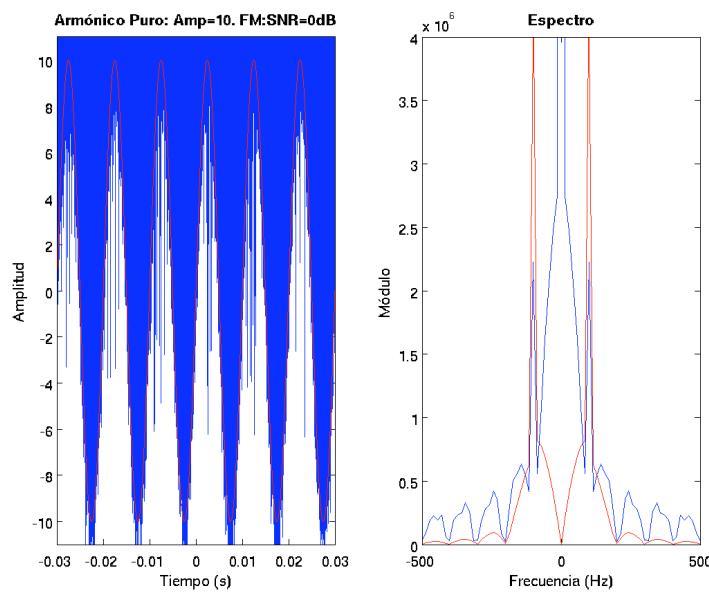
### 4.1. FRECUENCIA PORTADORA 1 MHZ.-

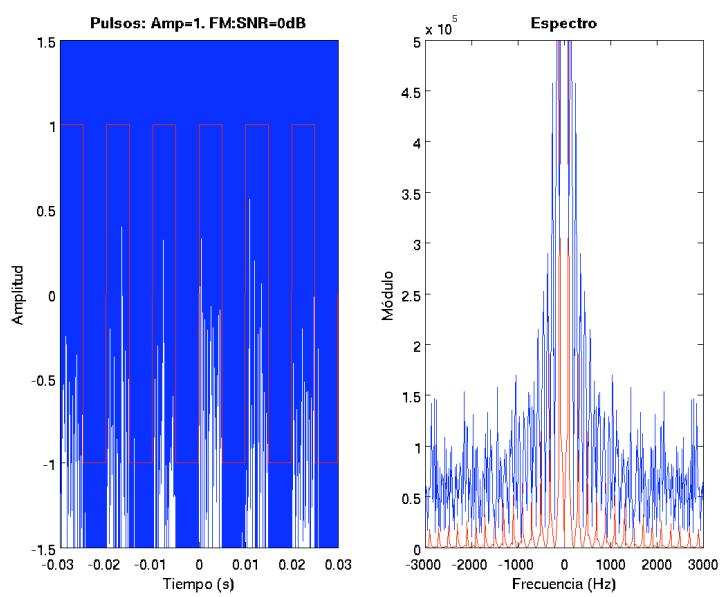
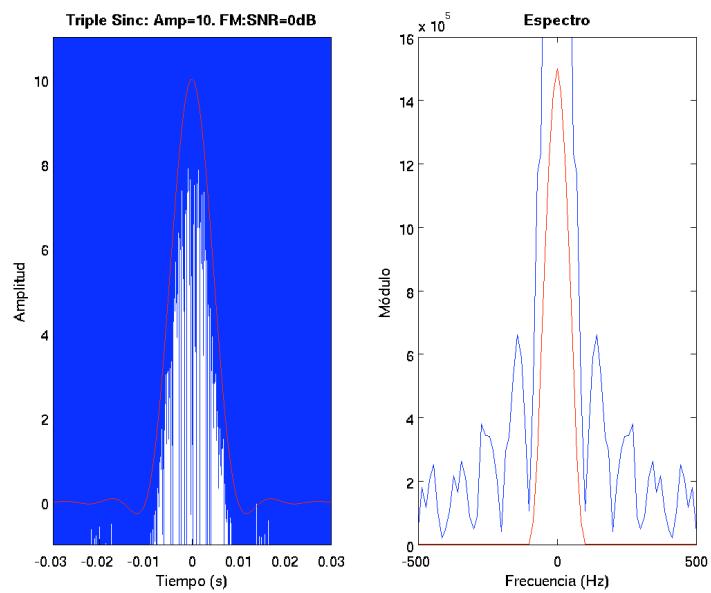
#### 4.1.1. CANAL ALTO RUIDO (SNR 0 dB)

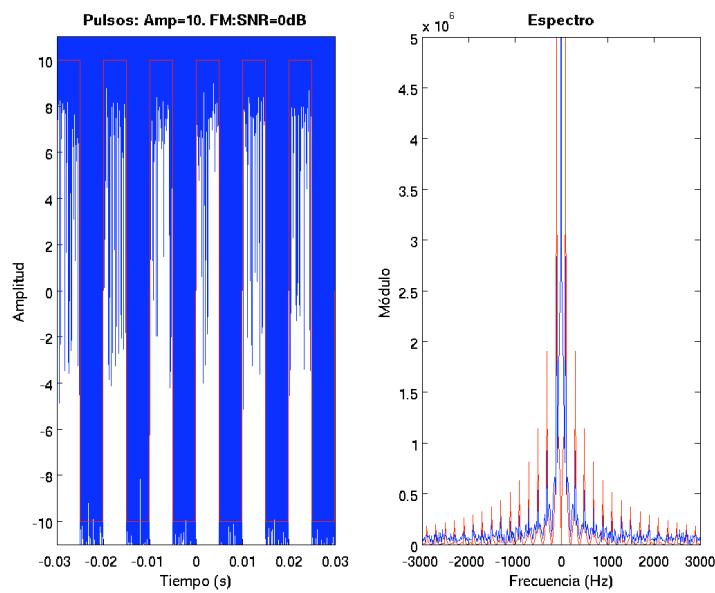
##### 4.1.1.1. MODULACIÓN FM

###### a. Desviación en frecuencia: 50 kHz.

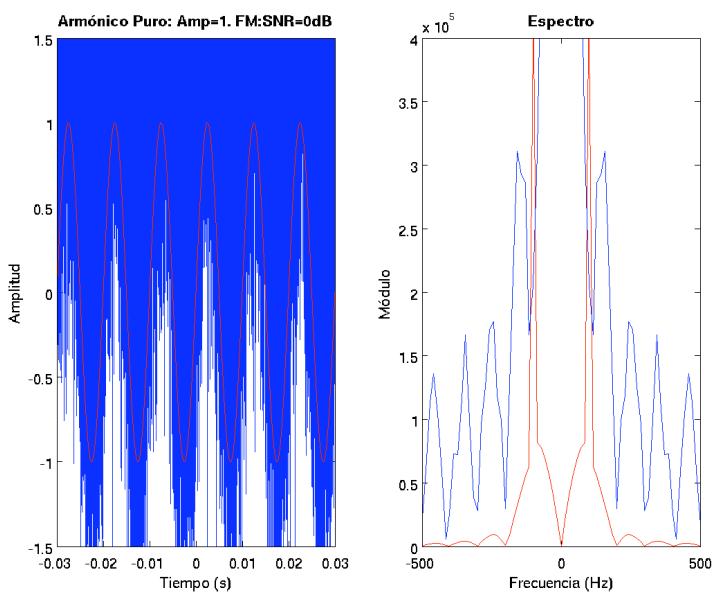


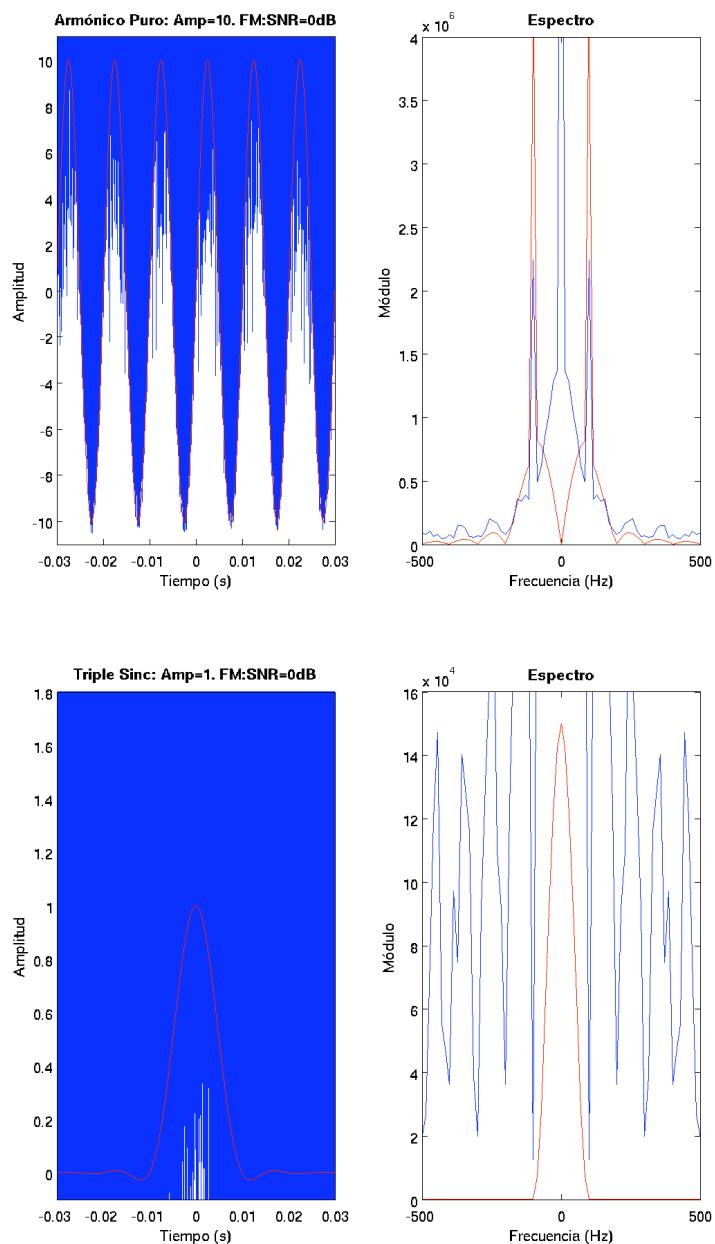


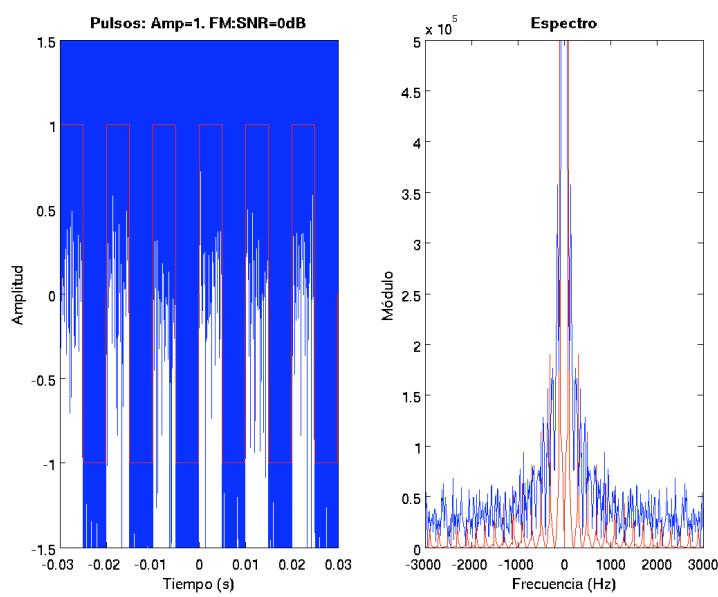
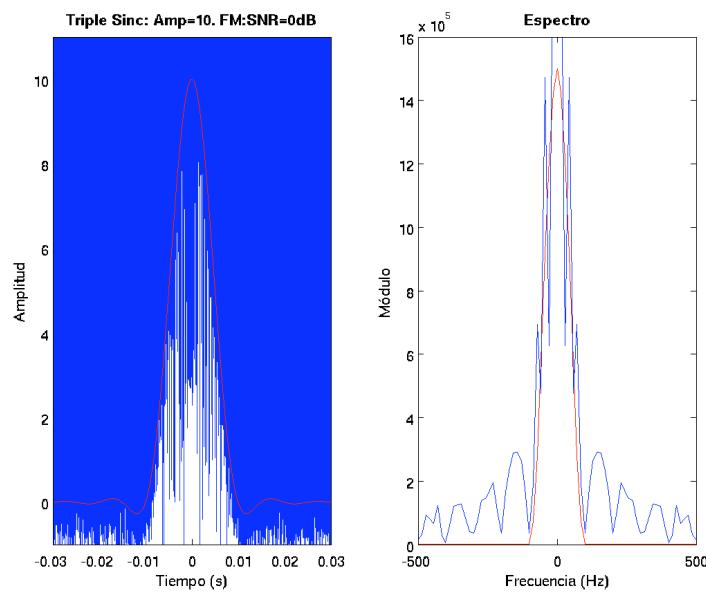


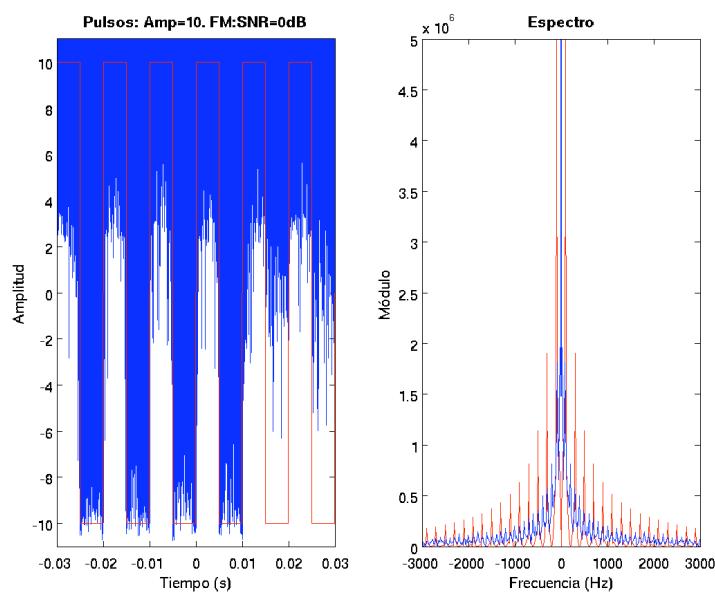


b. Desviación en frecuencia: 100 kHz.



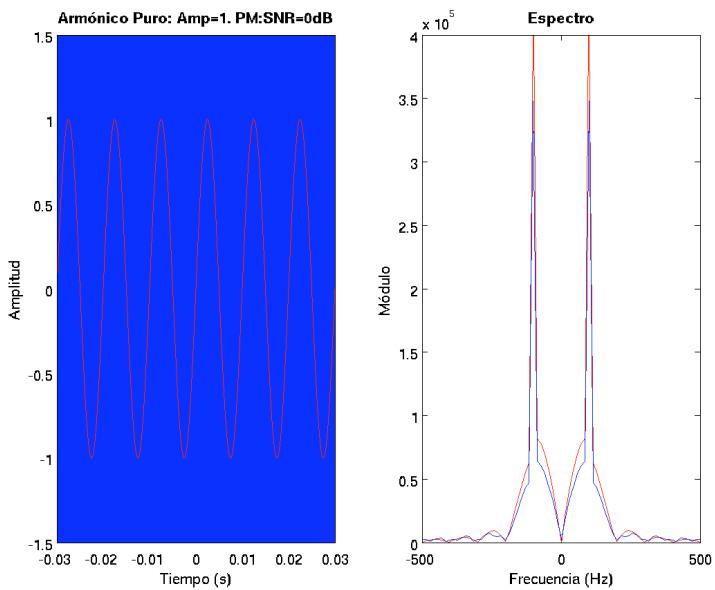


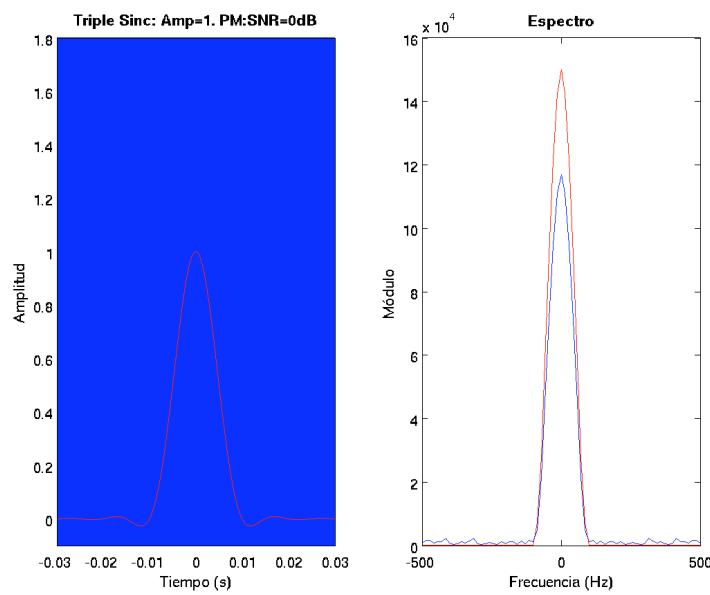
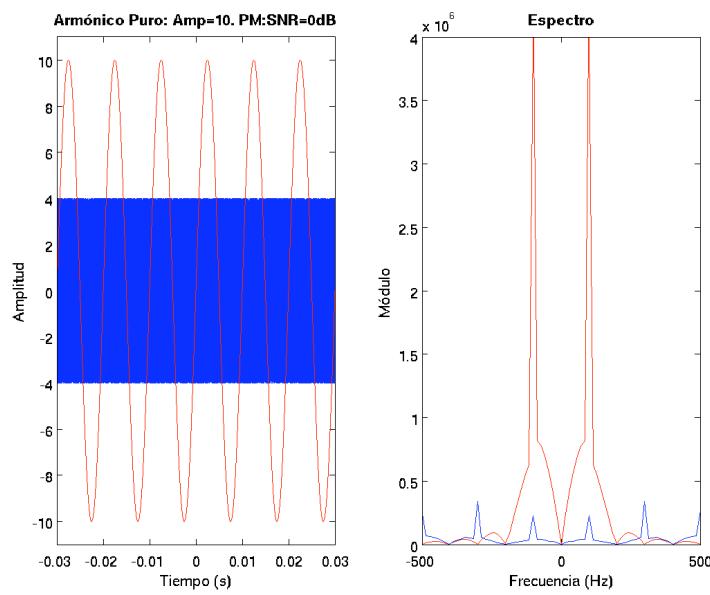


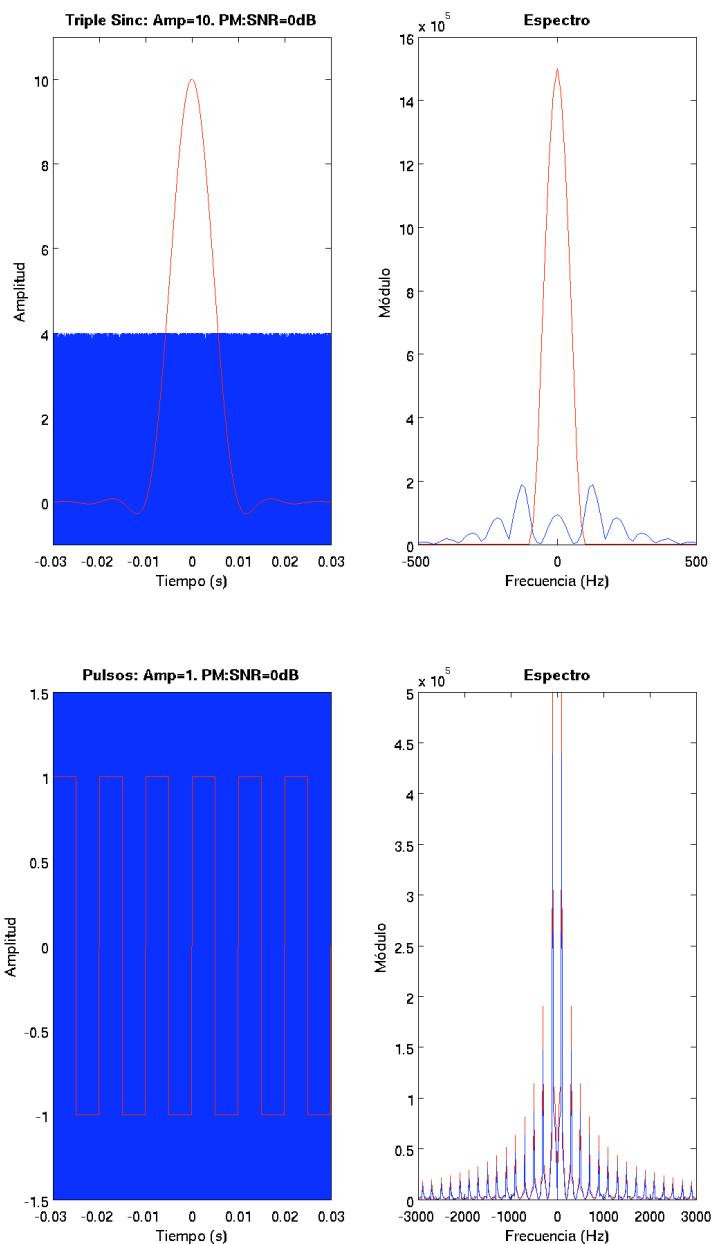


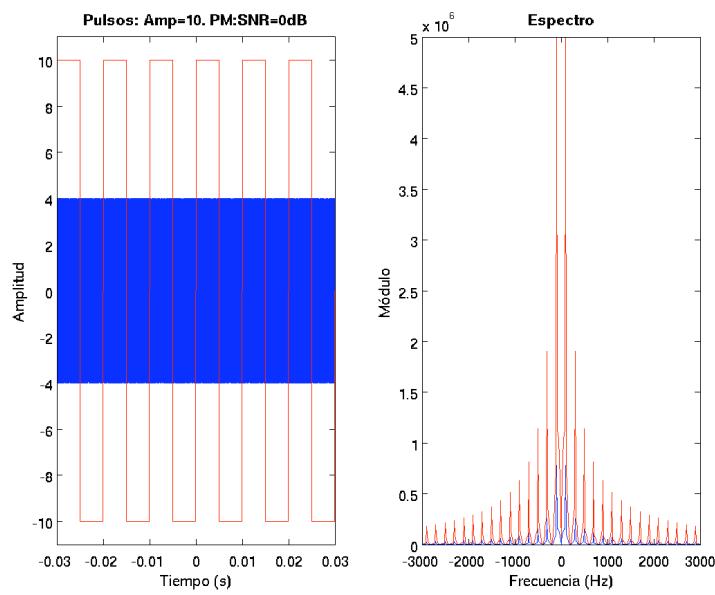
#### 4.1.1.2. MODULACIÓN PM

##### a. Desviación en fase: $\pi/4$ .

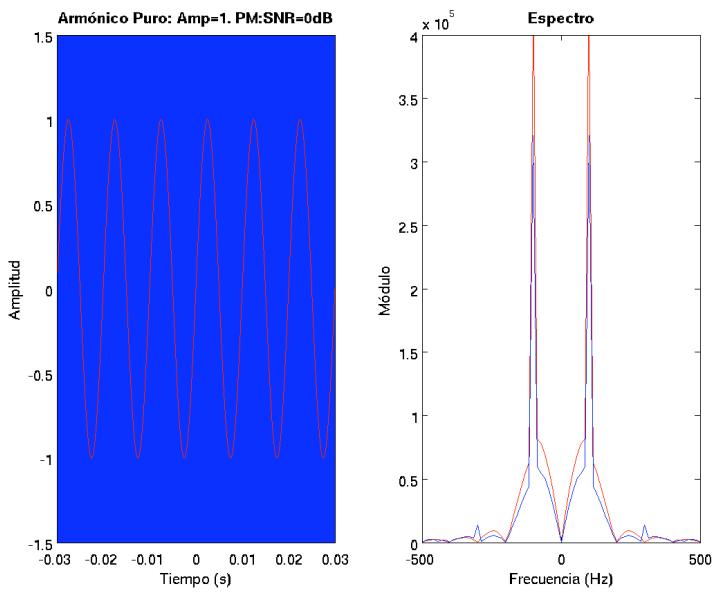


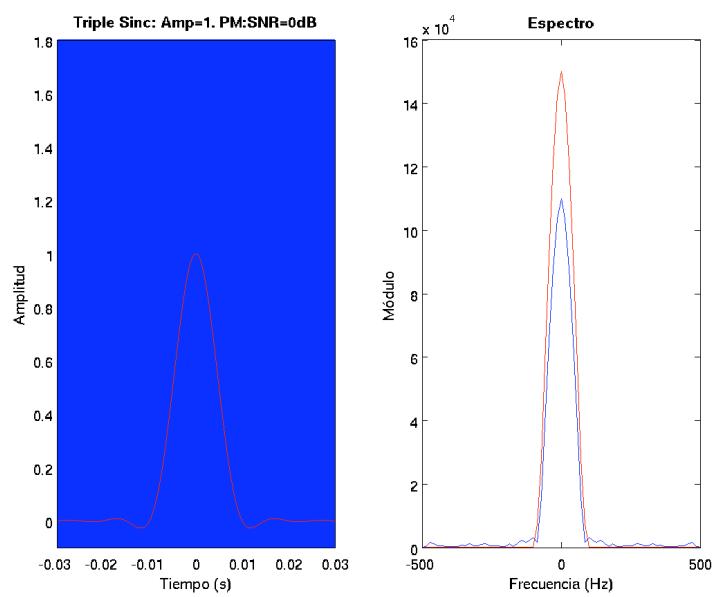
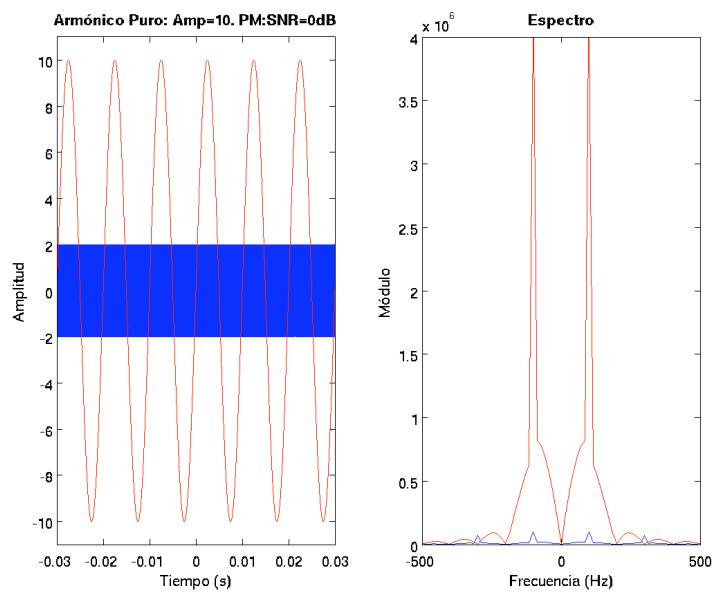


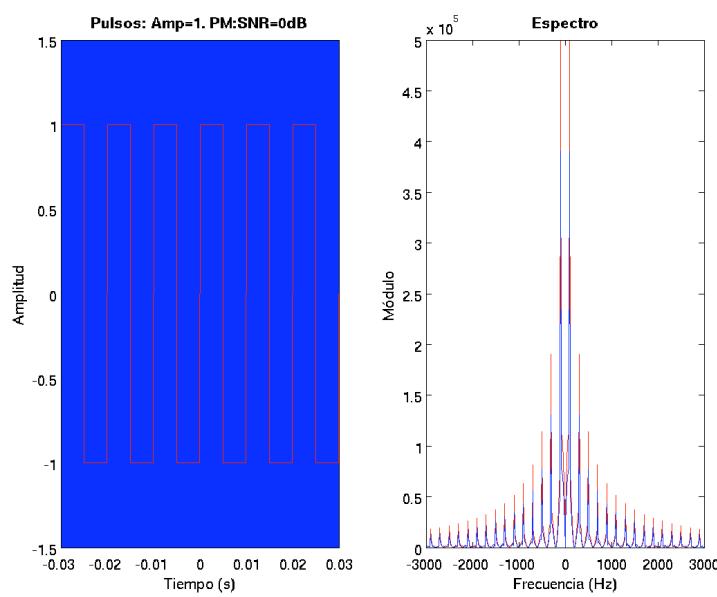
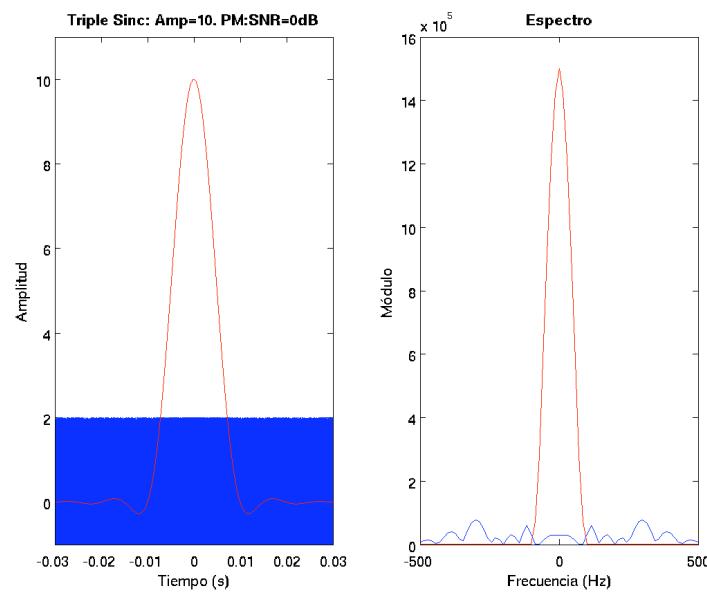


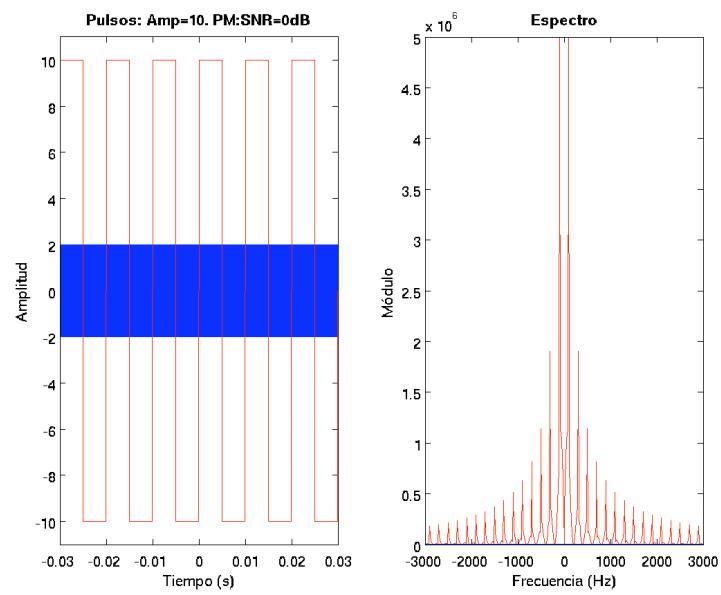


b. Desviación en fase:  $\pi/2$ .





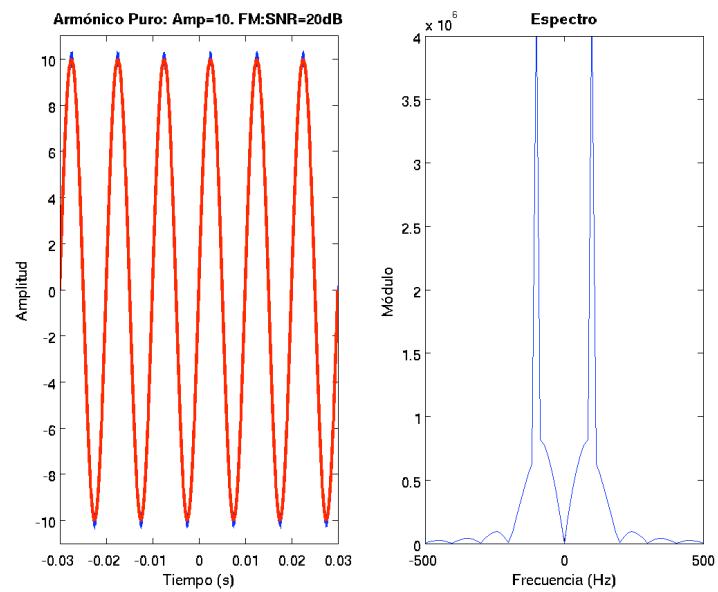
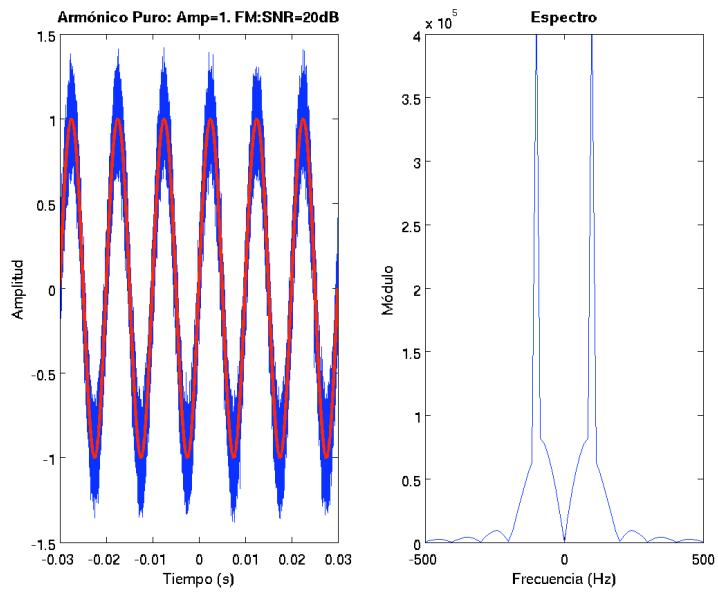


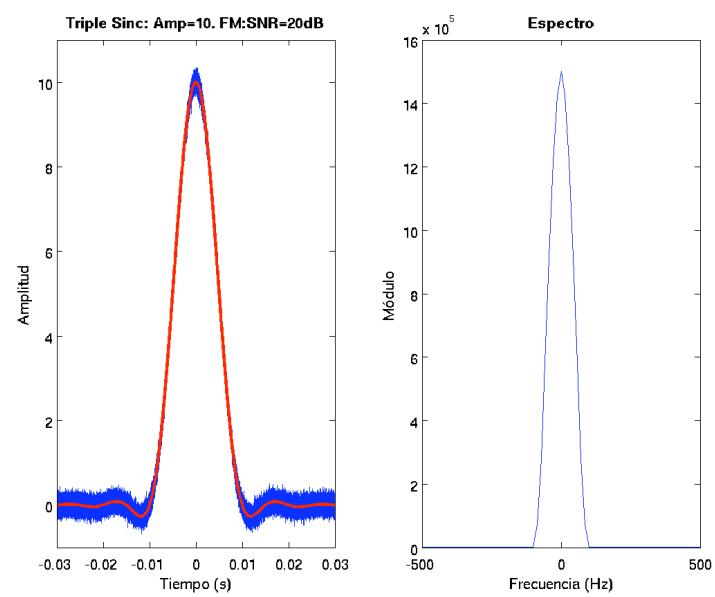
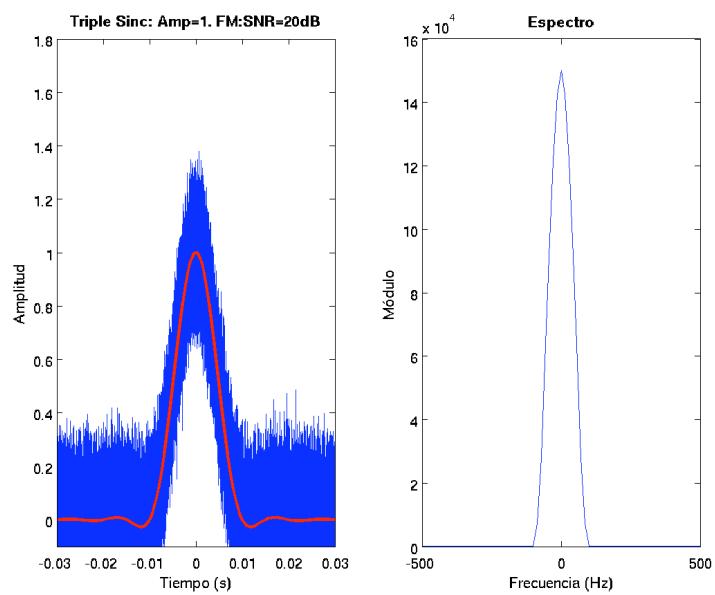


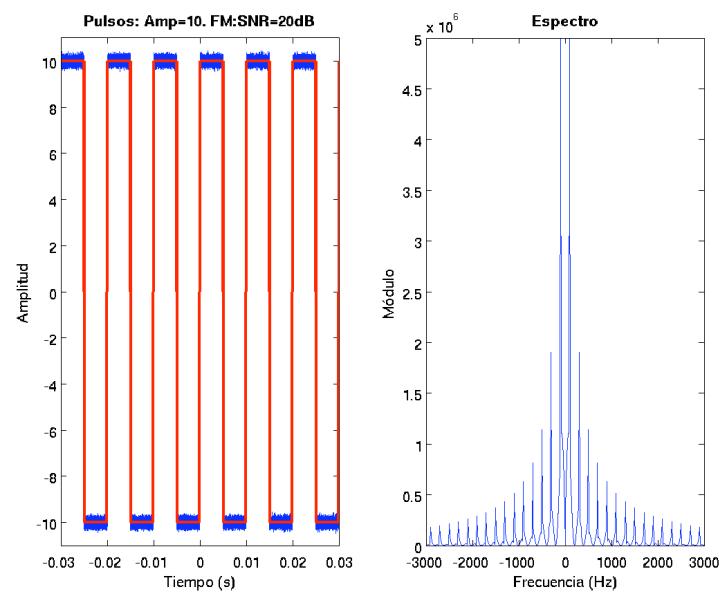
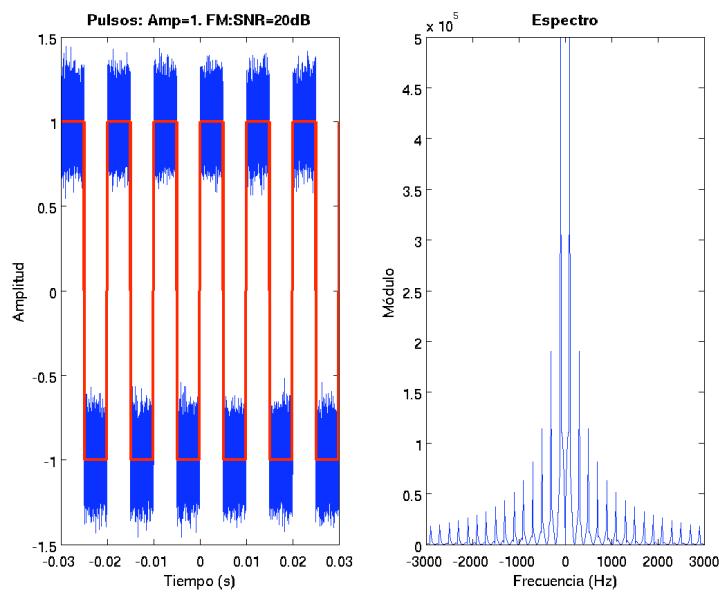
## 4.1.2. CANAL BAJO RUIDO (SNR 20 dB)

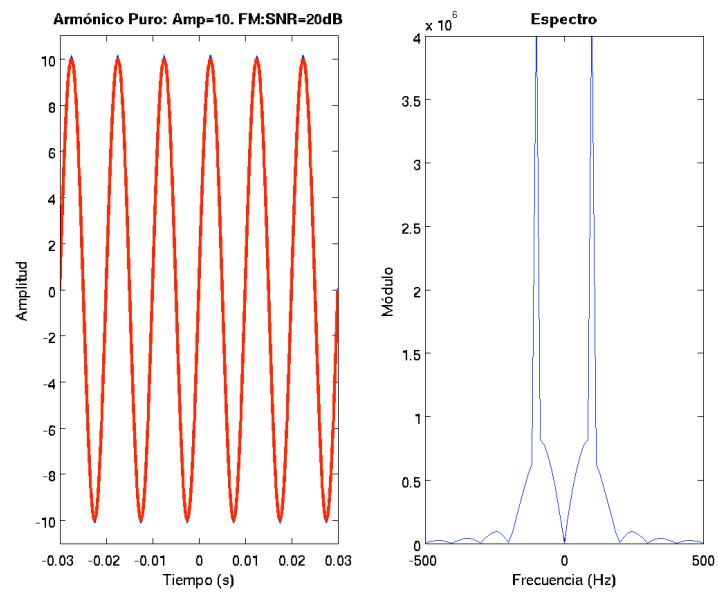
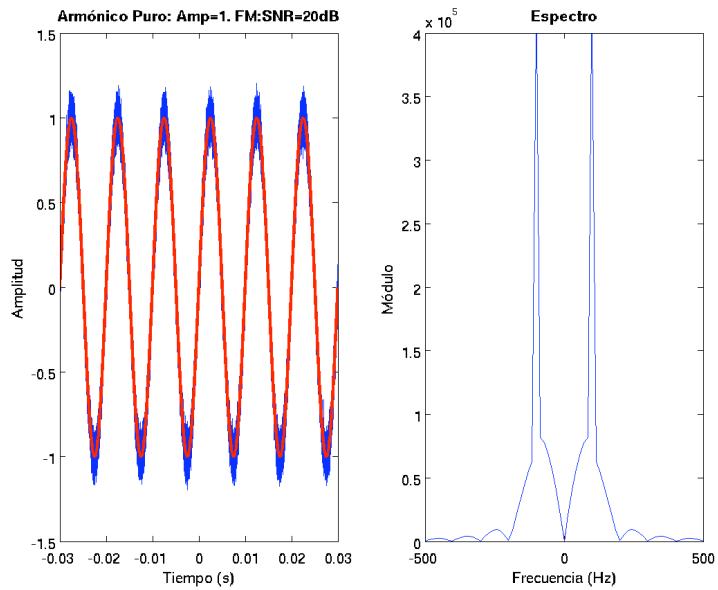
### 4.1.2.1. MODULACIÓN FM

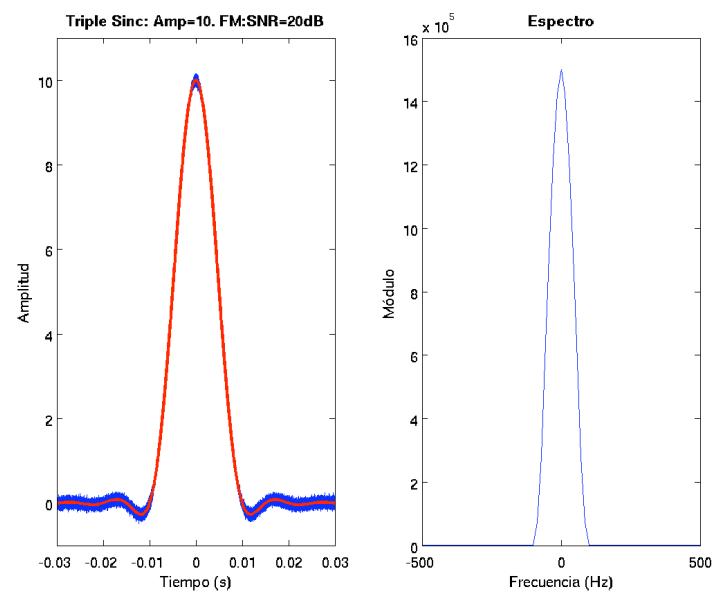
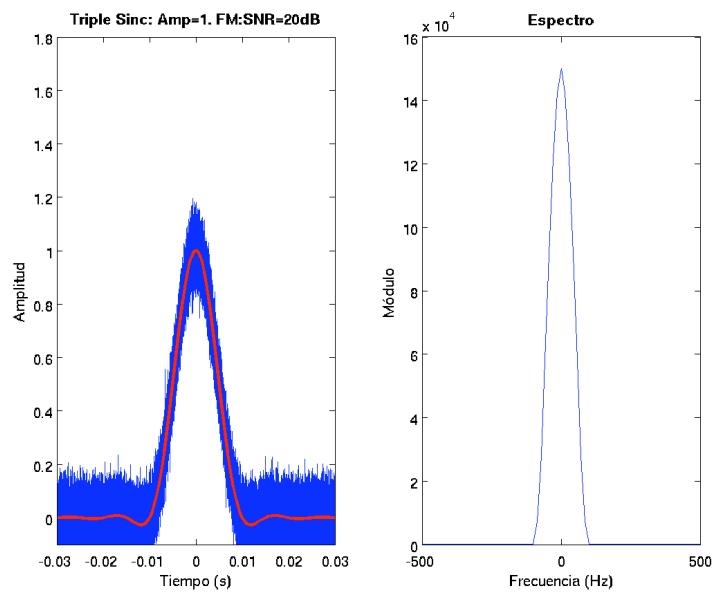
a. Desviación en frecuencia: 50 kHz.

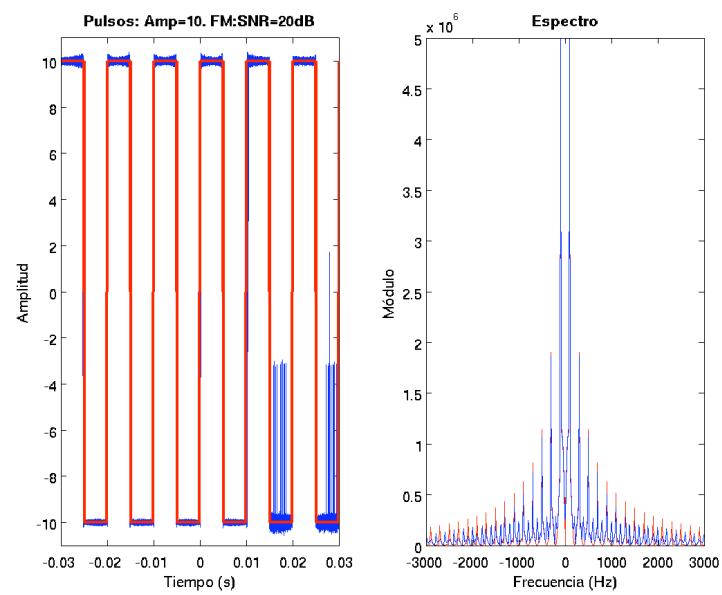
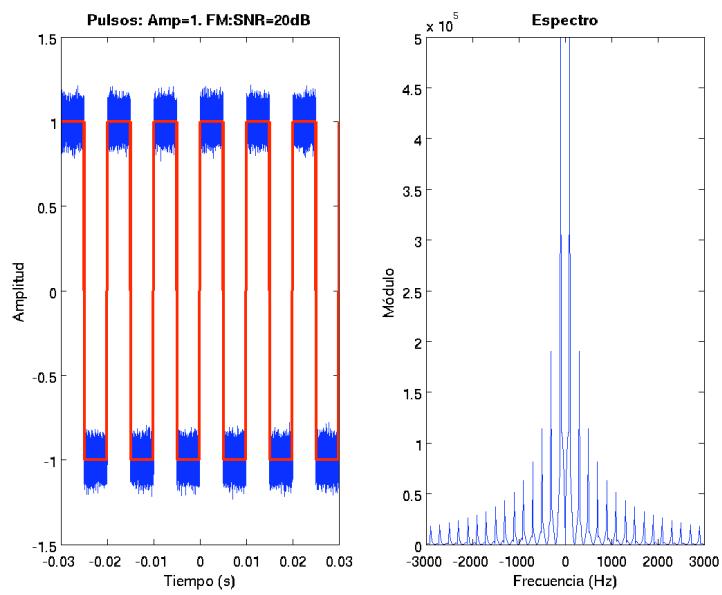






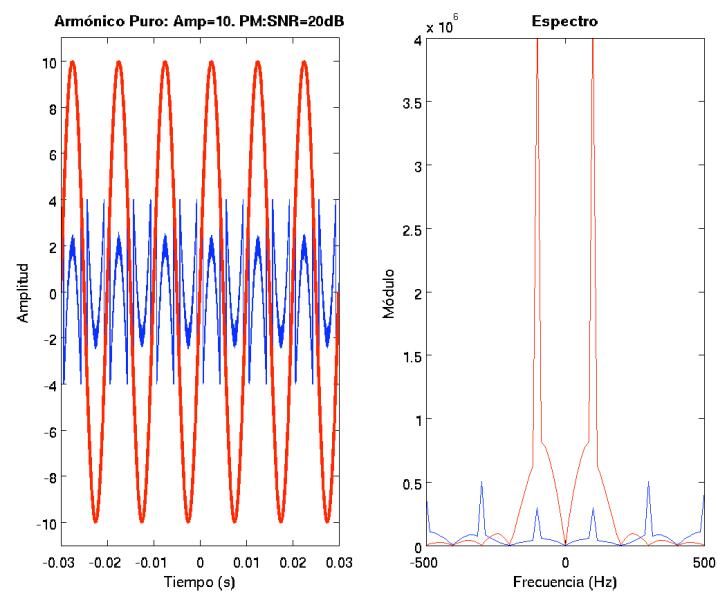
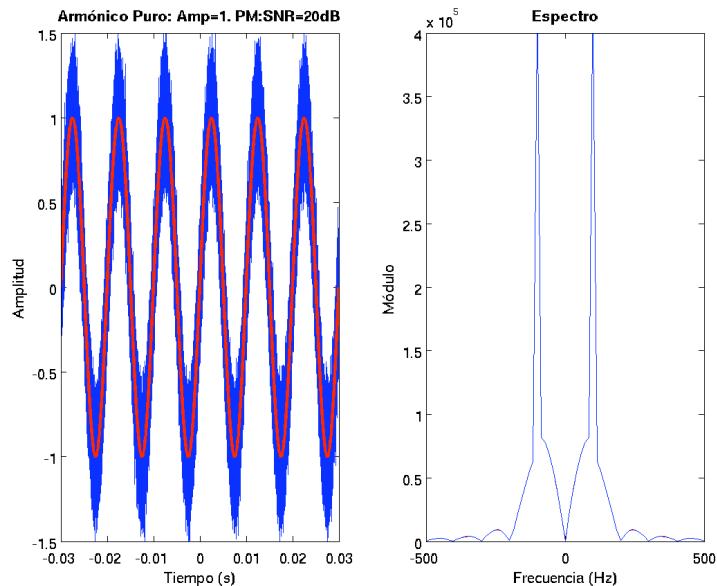
**b. Desviación en frecuencia: 100 kHz.**

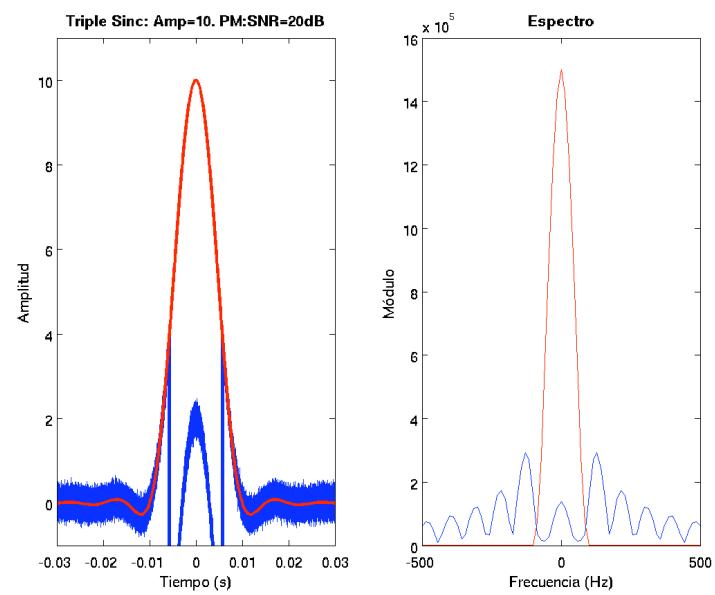
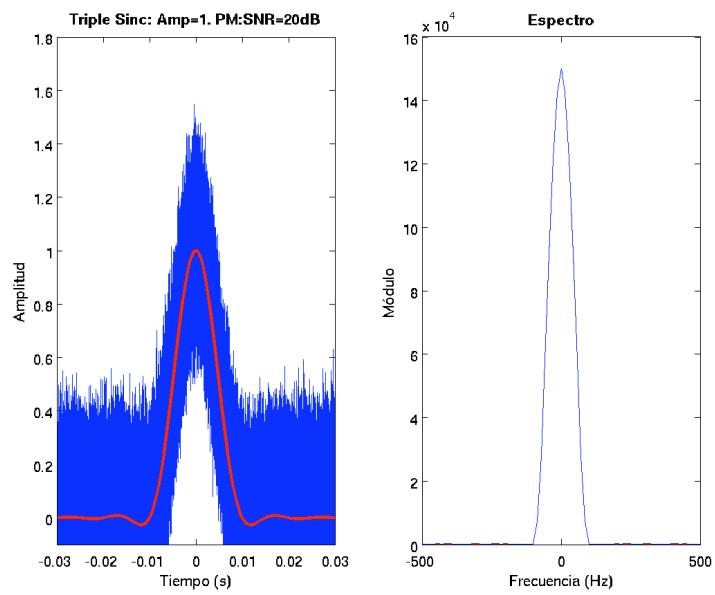


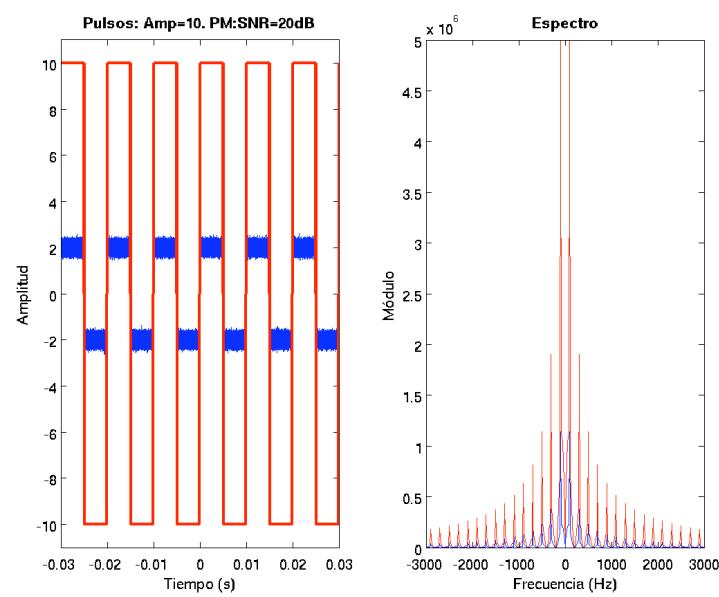
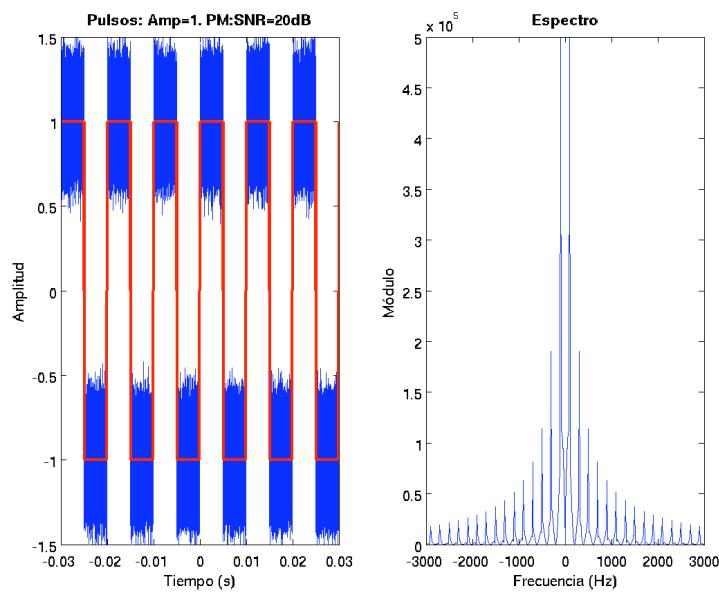


#### 4.1.2.2. MODULACIÓN PM

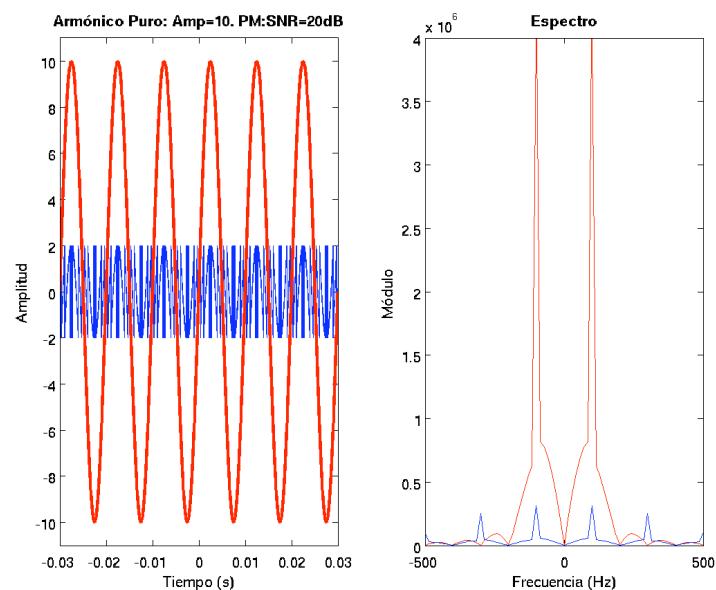
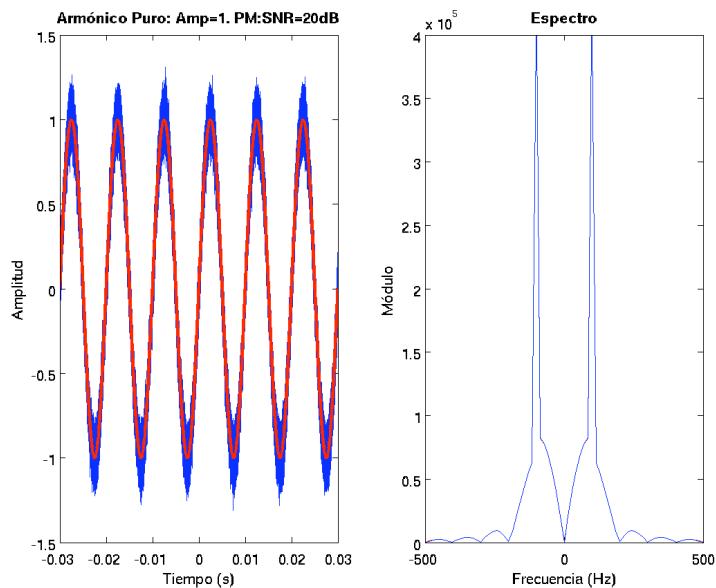
a. Desviación en fase:  $\pi/4$ .

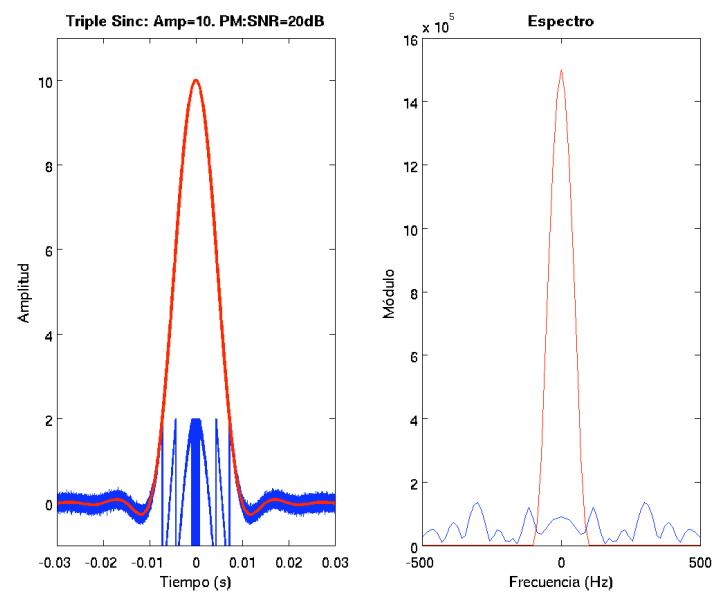
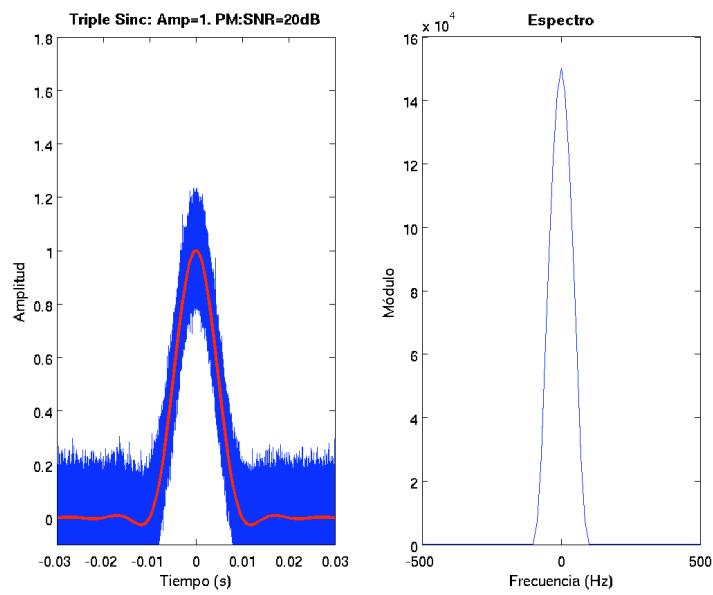


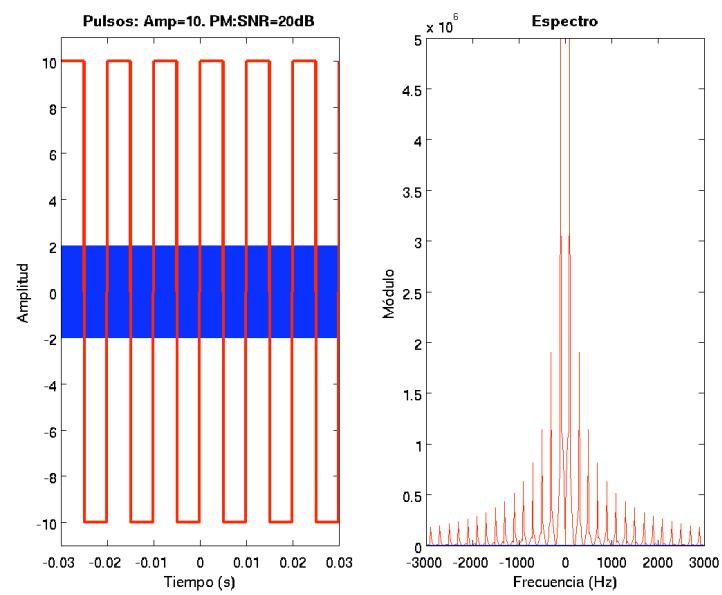
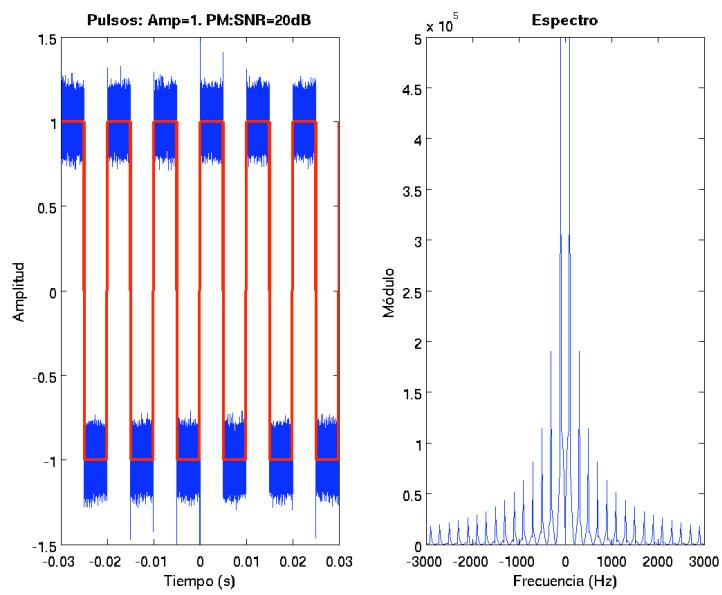




b. Desviación en fase:  $\pi/2$ .





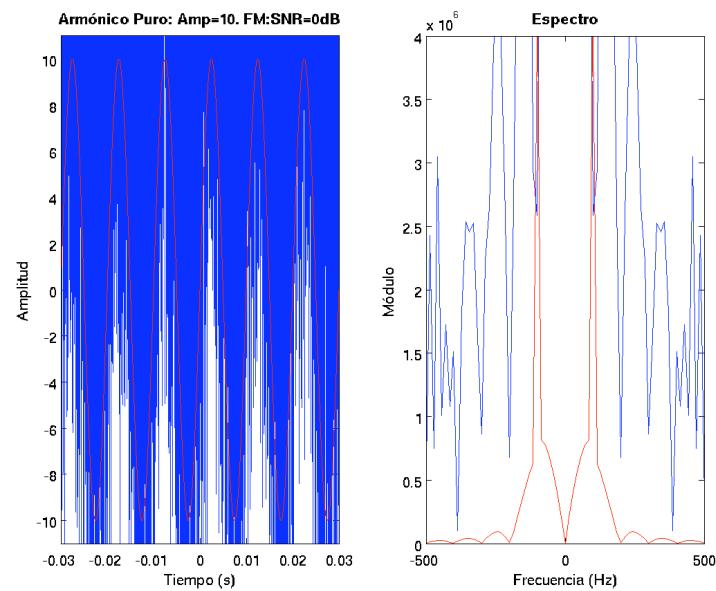
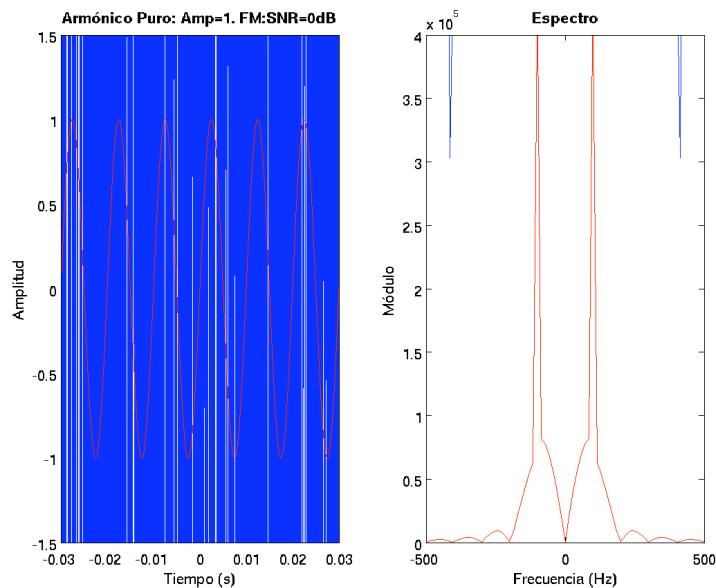


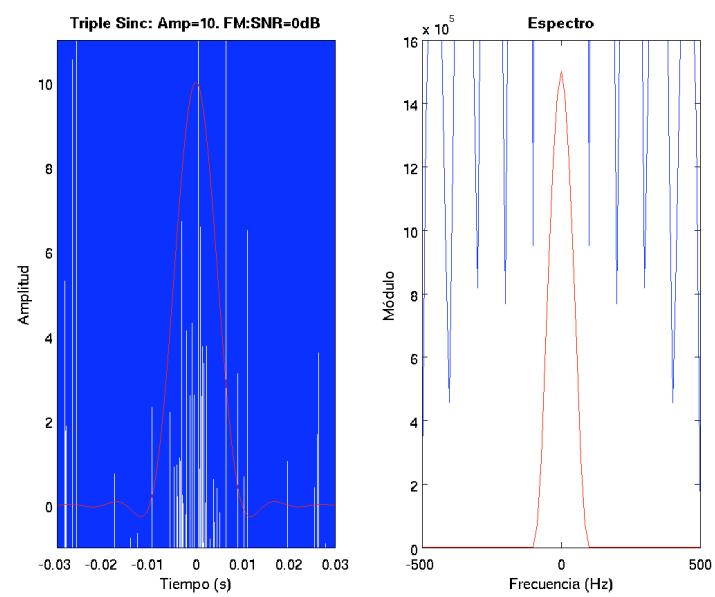
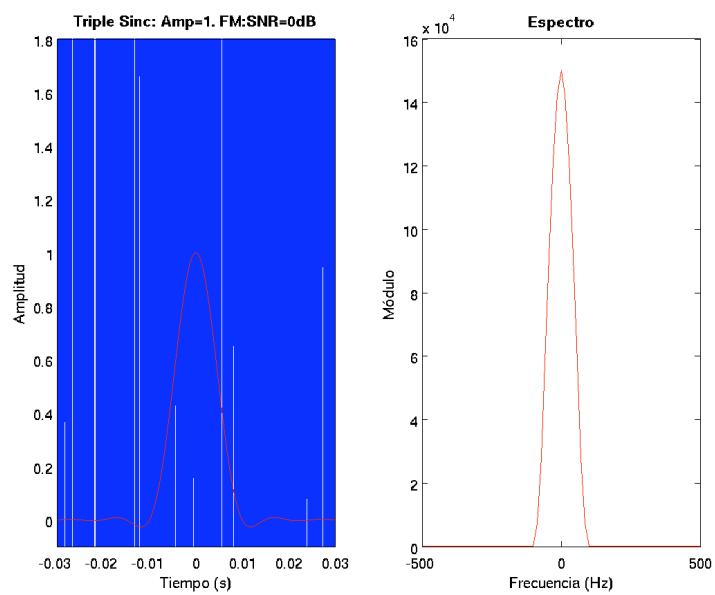
## 4.2. FRECUENCIA PORTADORA 100 KHZ.-

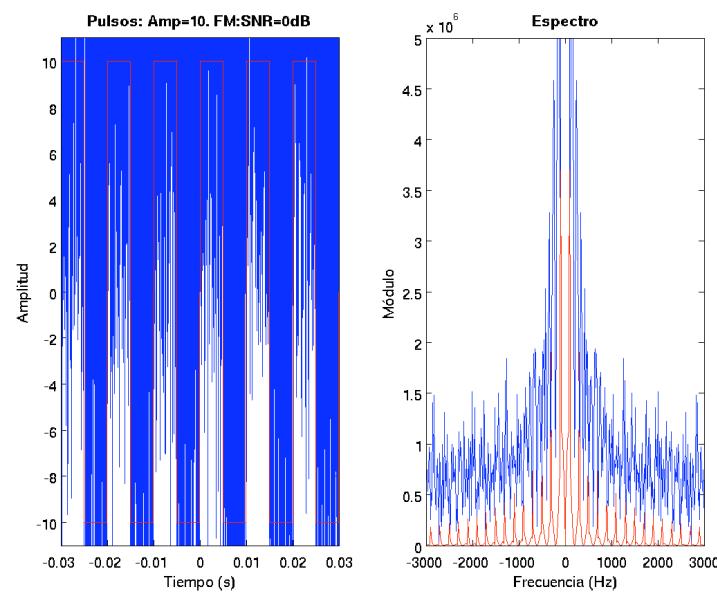
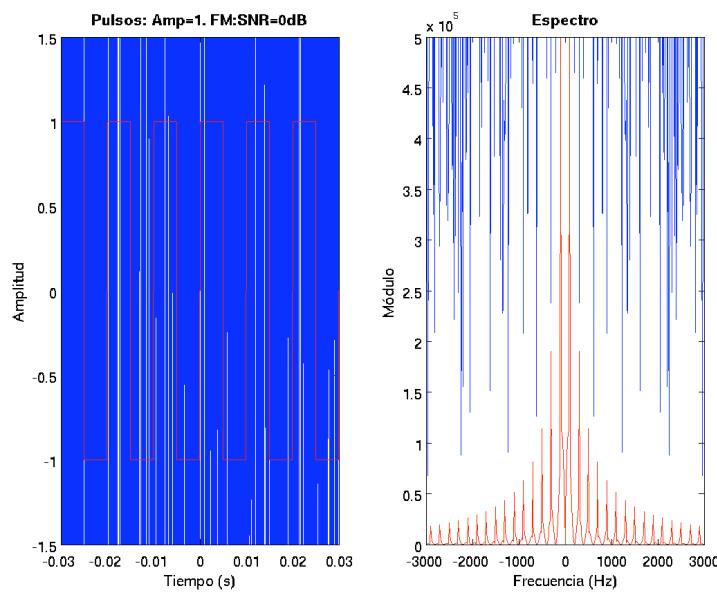
### 4.2.1. CANAL ALTO RUIDO (SNR 0 dB)

#### 4.2.1.1. MODULACIÓN FM

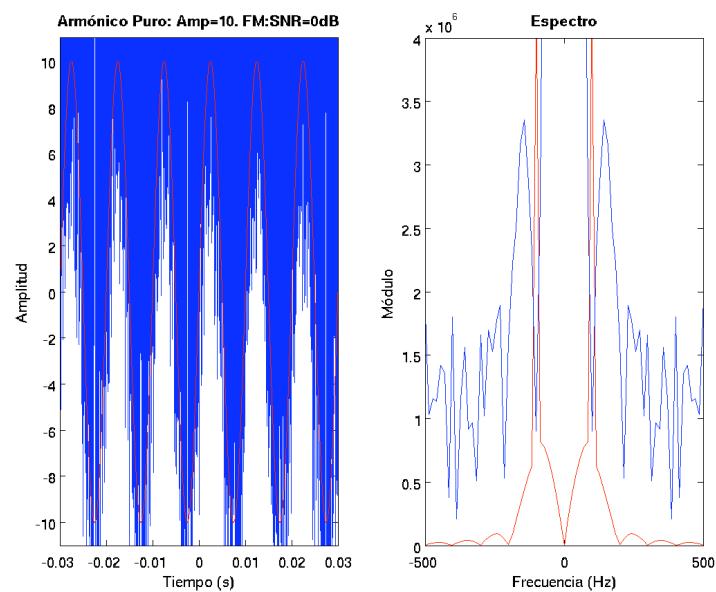
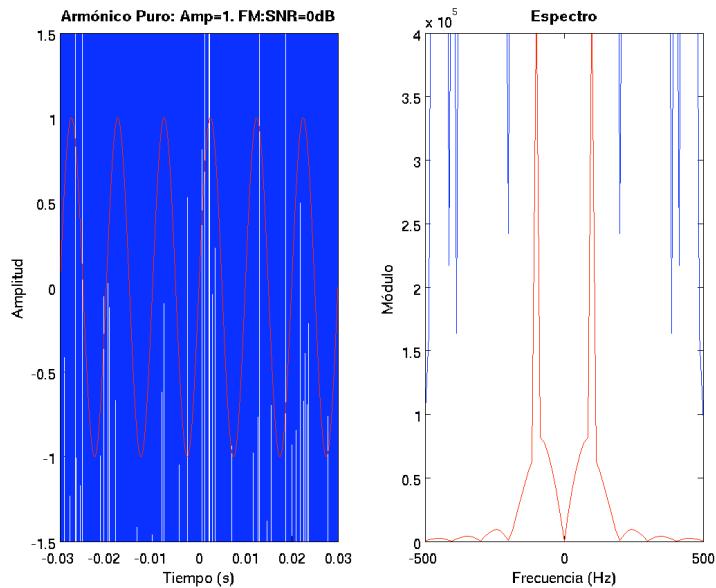
a. Desviación en frecuencia: 5 kHz.

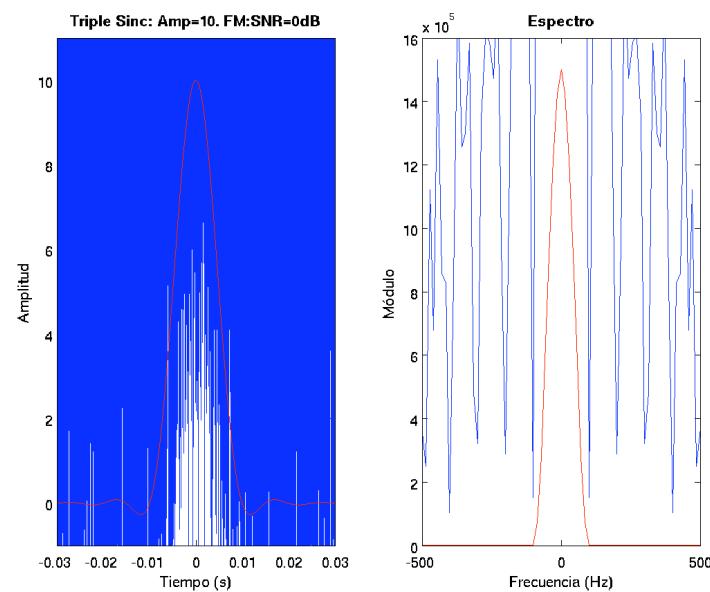
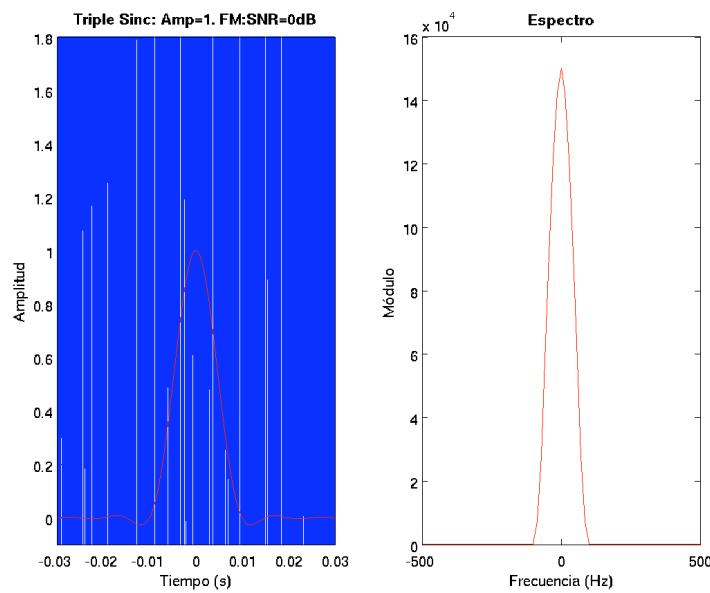


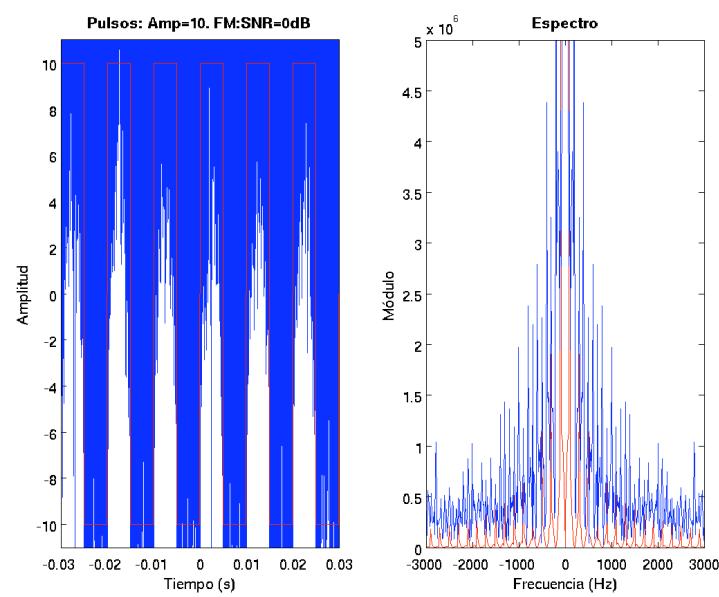
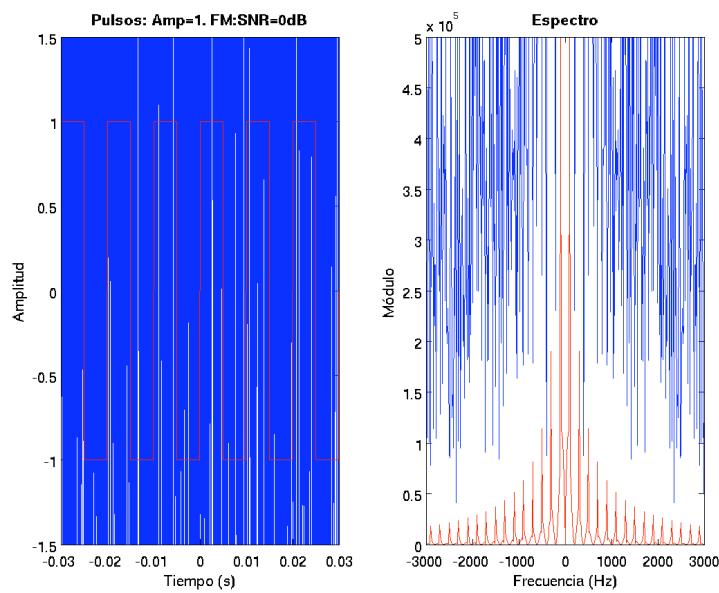




b. Desviación en frecuencia: 10 kHz.

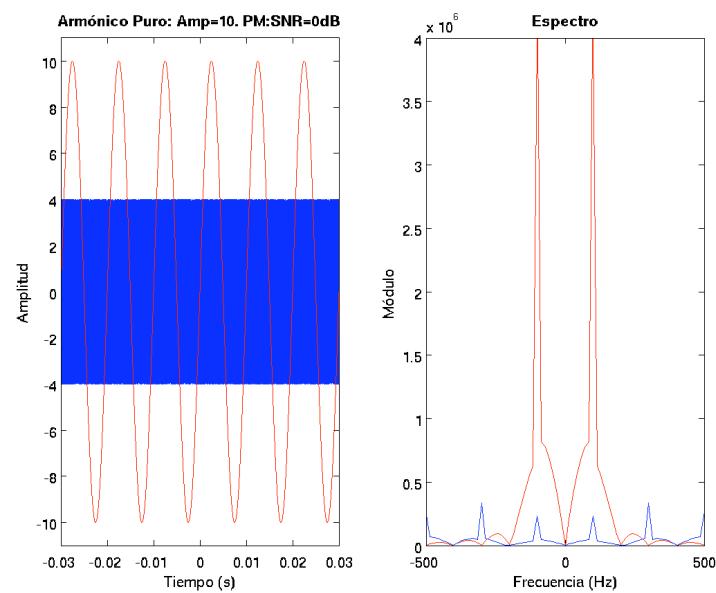
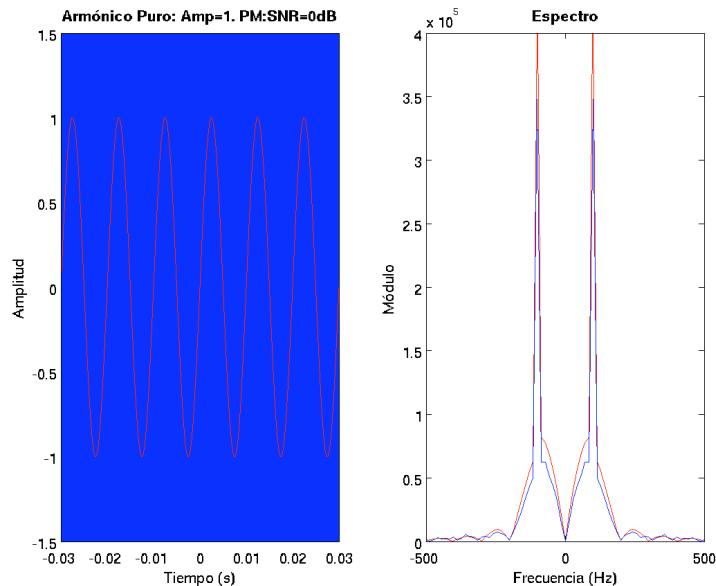


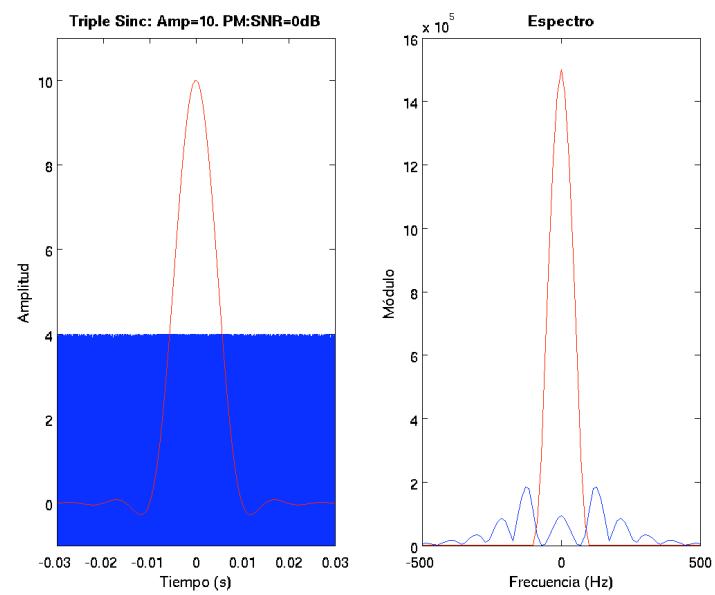
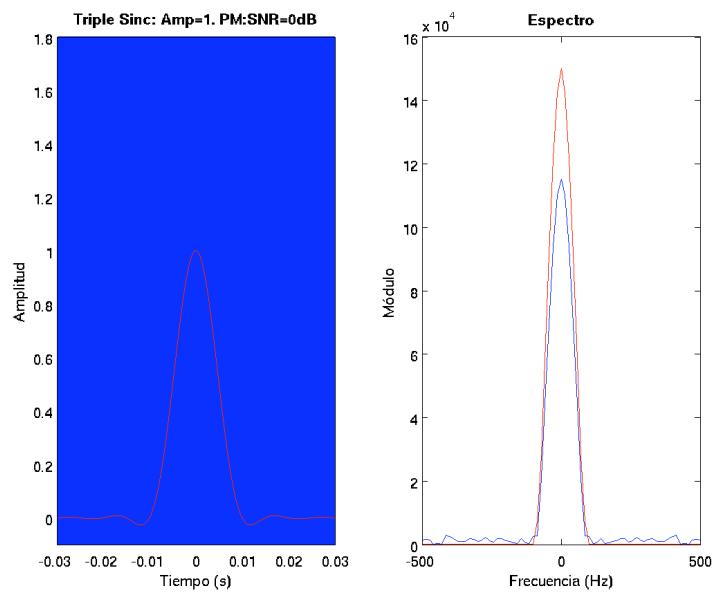


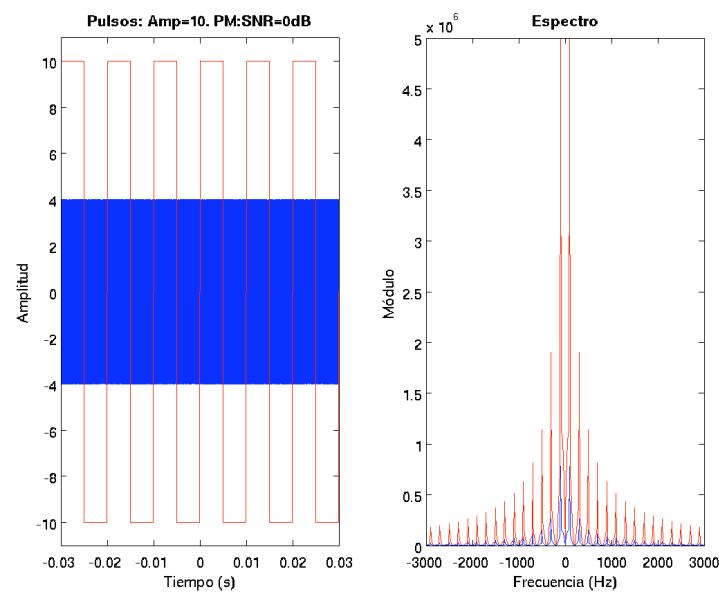
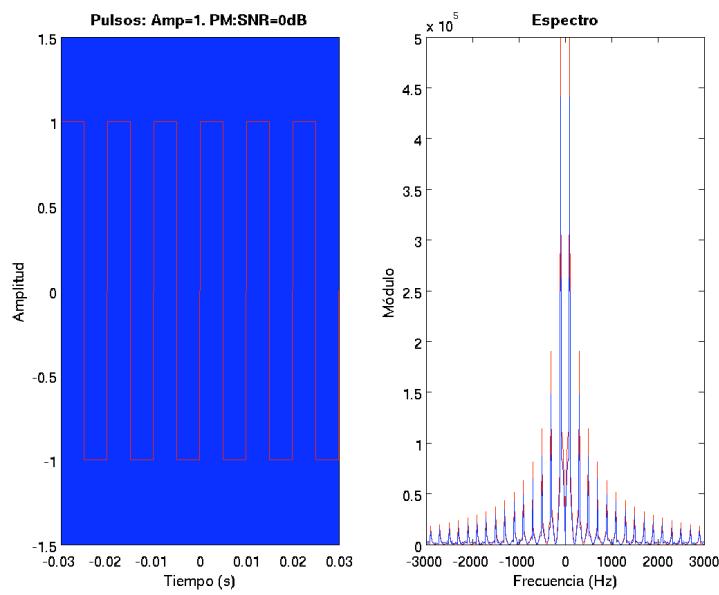


#### 4.2.1.2. MODULACIÓN PM

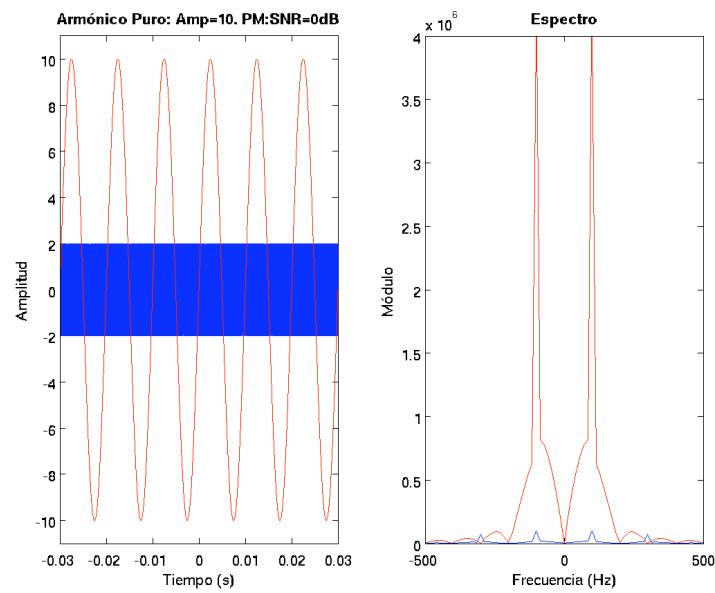
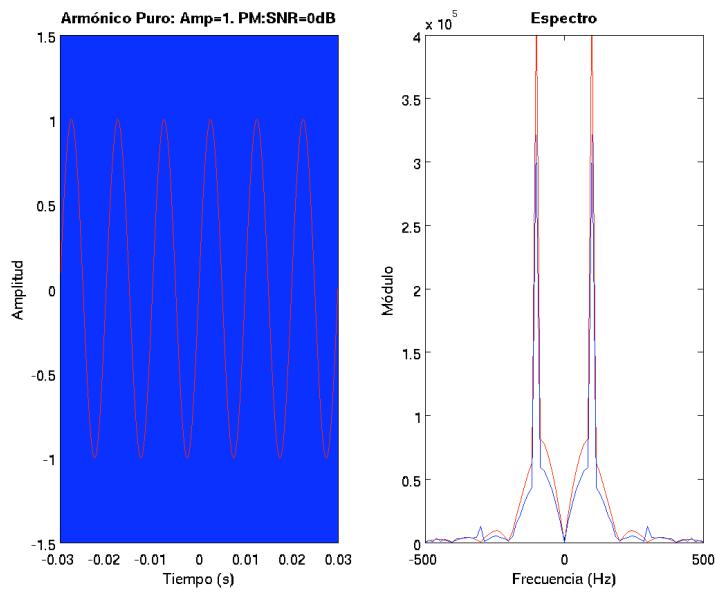
##### a. Desviación en fase: $\pi/4$ .

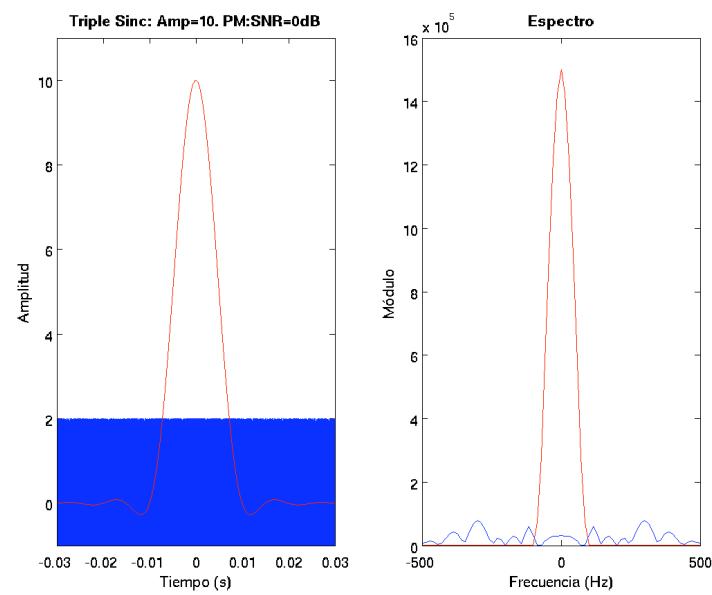
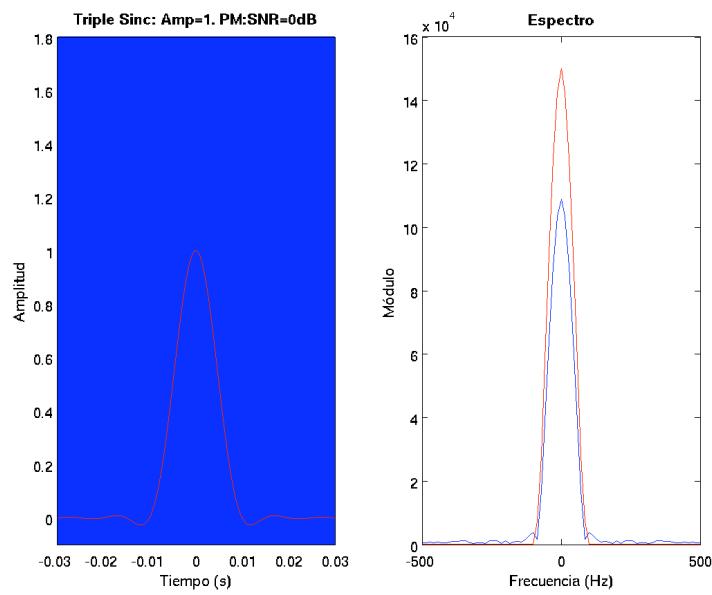


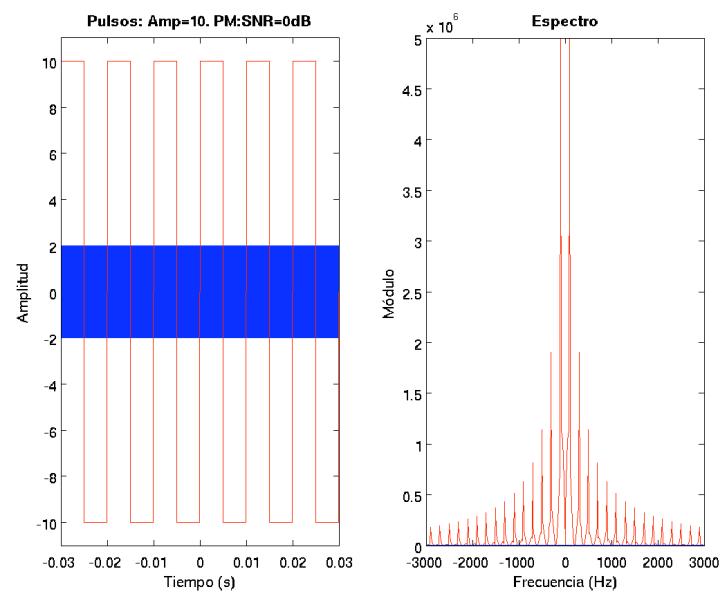
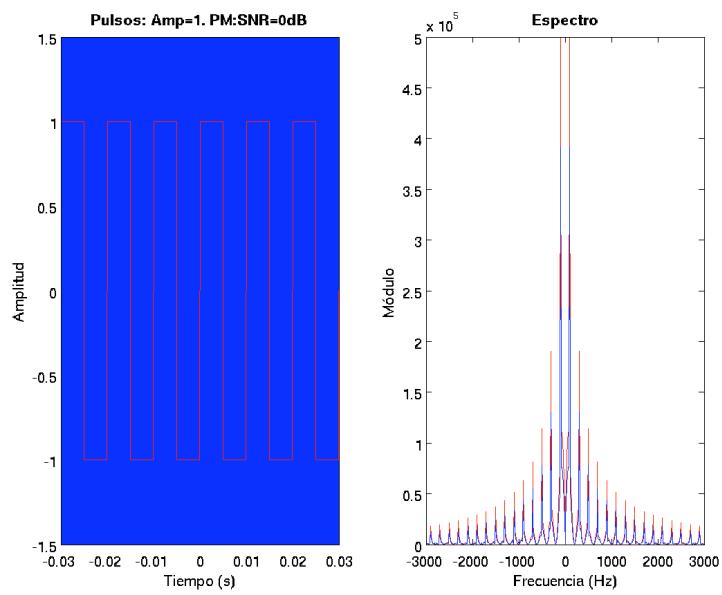




b. Desviación en fase:  $\pi/2$ .



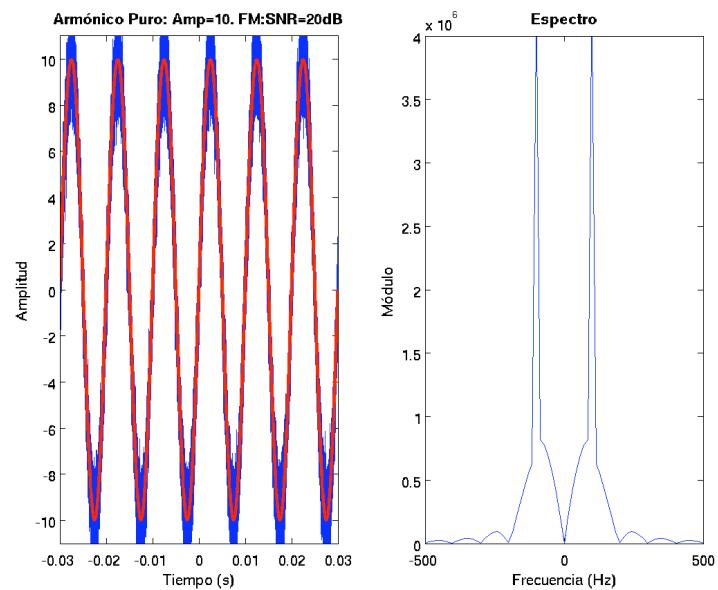
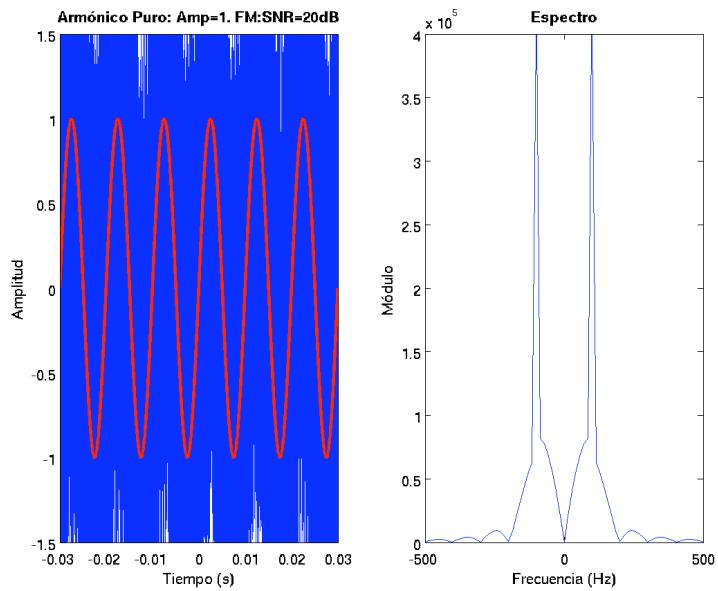


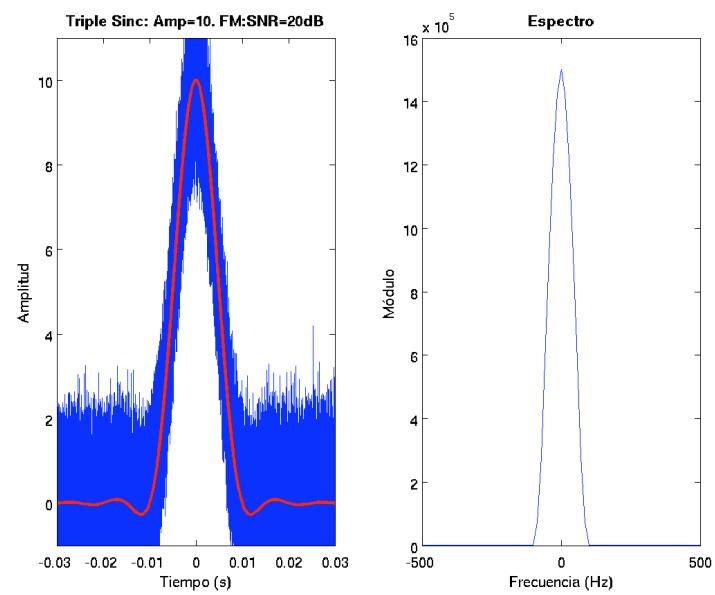
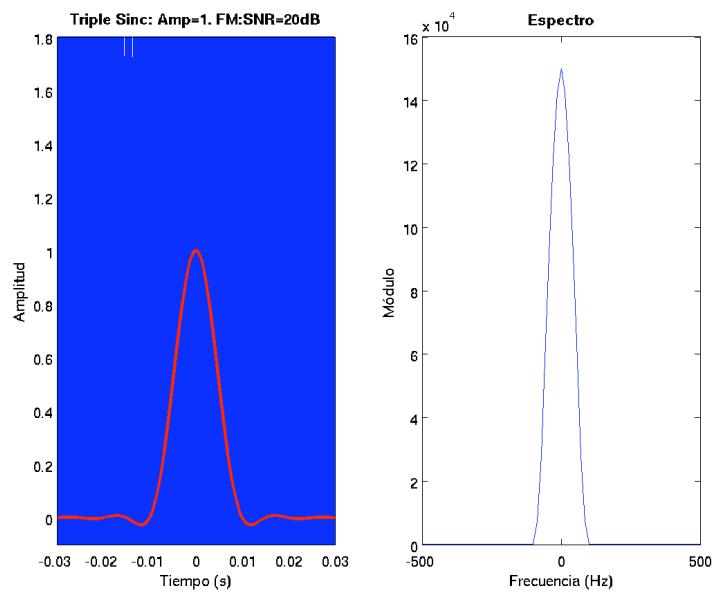


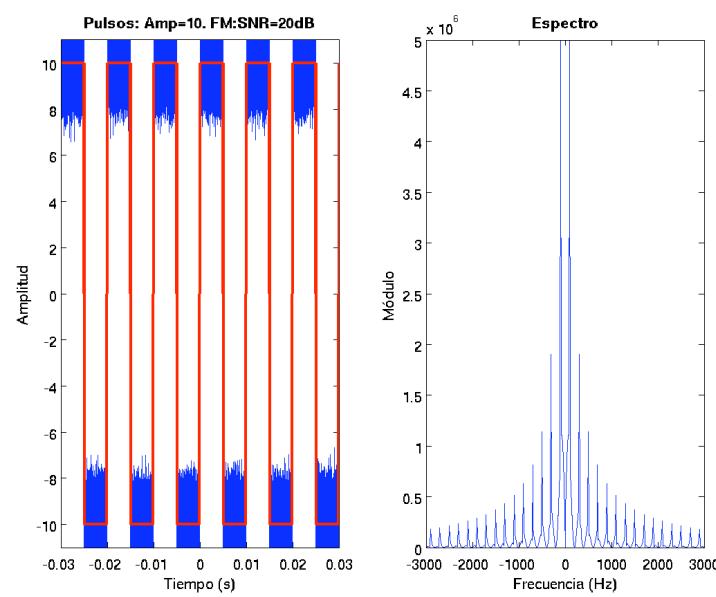
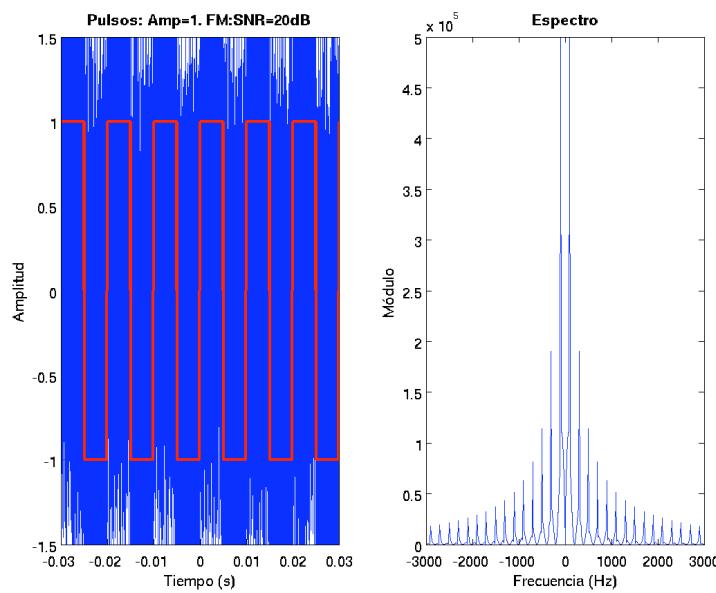
## 4.2.2. CANAL BAJO RUIDO (SNR 20 dB)

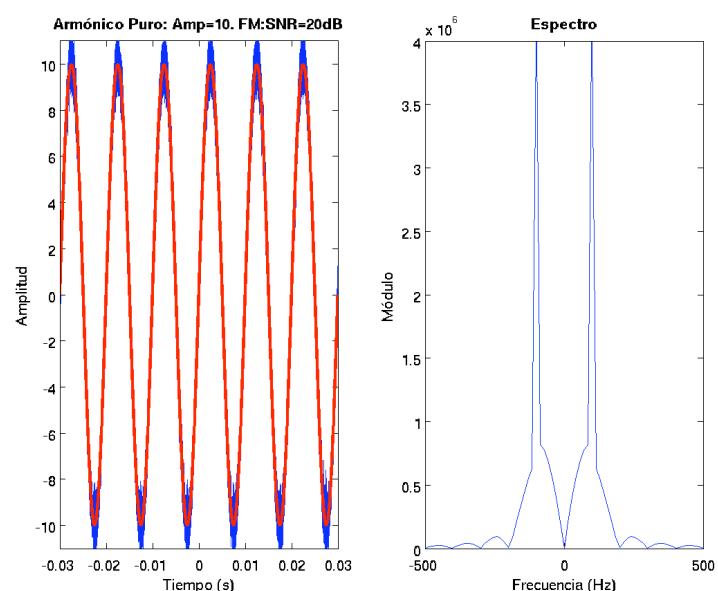
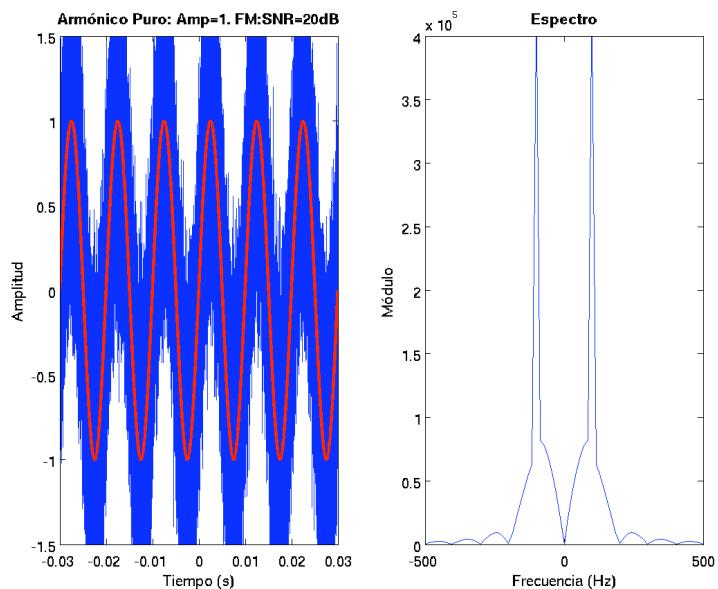
### 4.2.2.1. MODULACIÓN FM

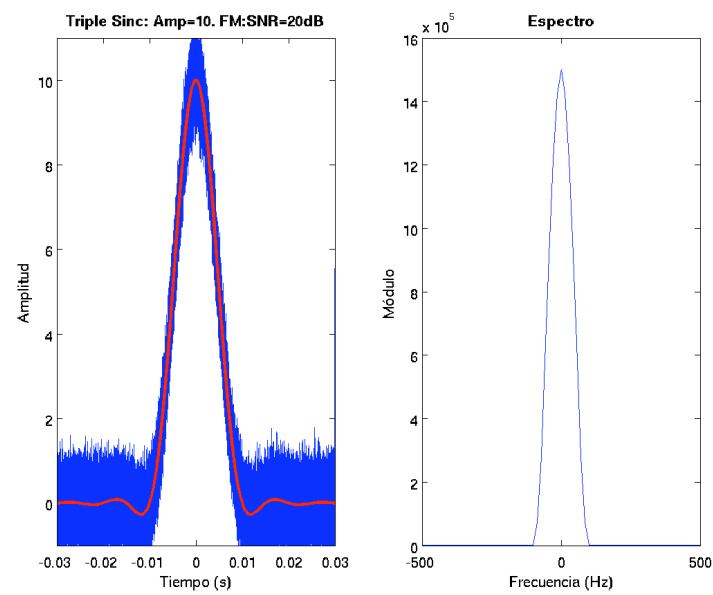
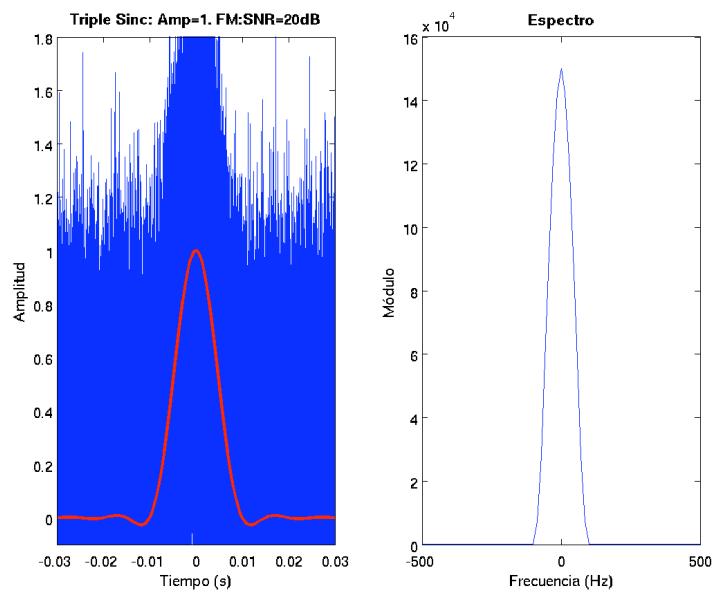
a. Desviación en frecuencia: 5 kHz.

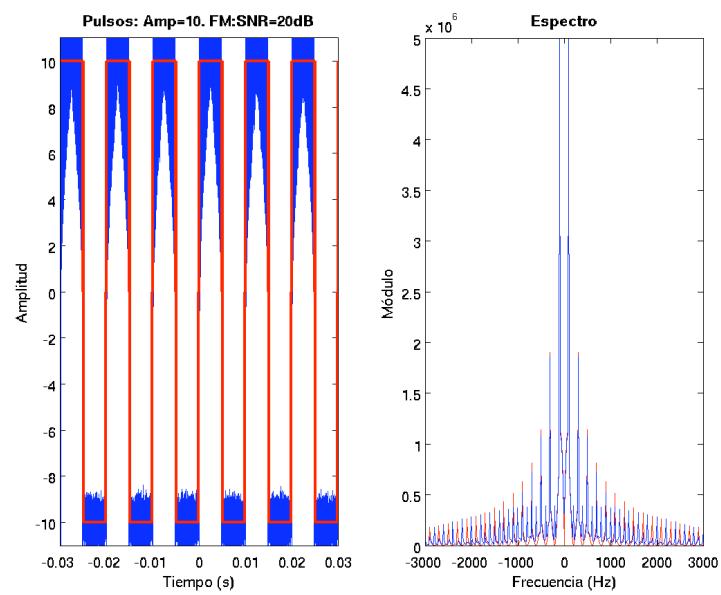
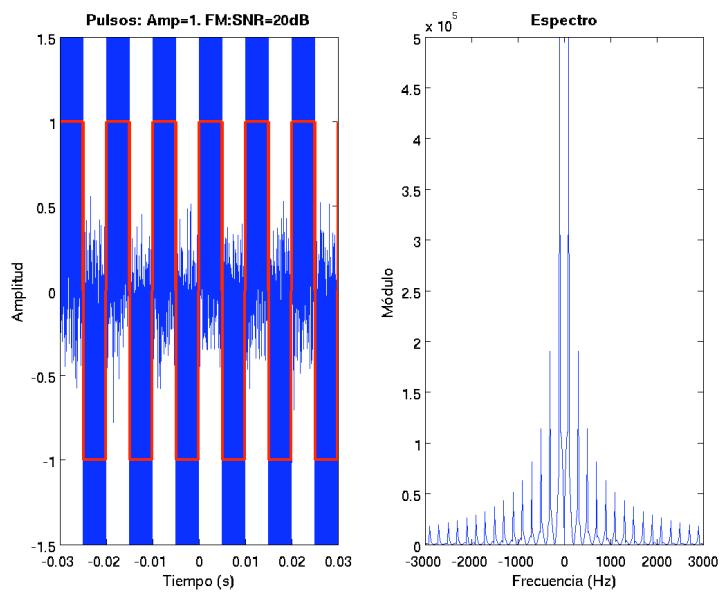






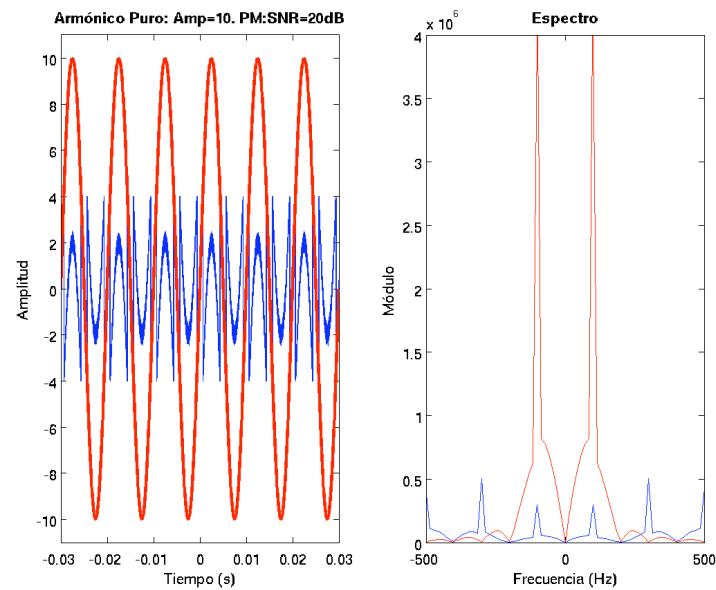
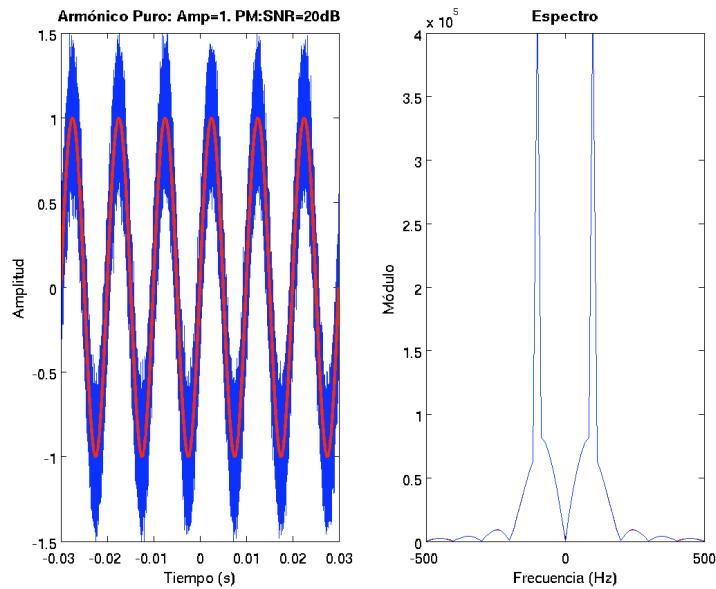
**b. Desviación en frecuencia: 10 kHz.**

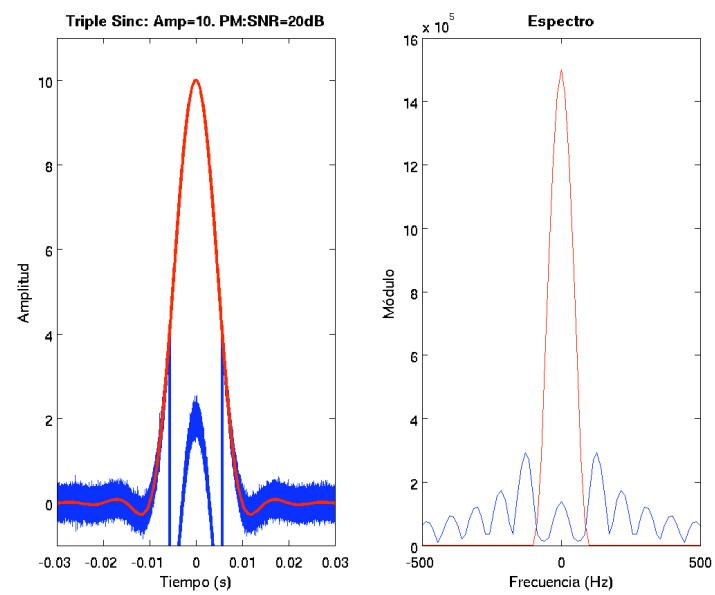
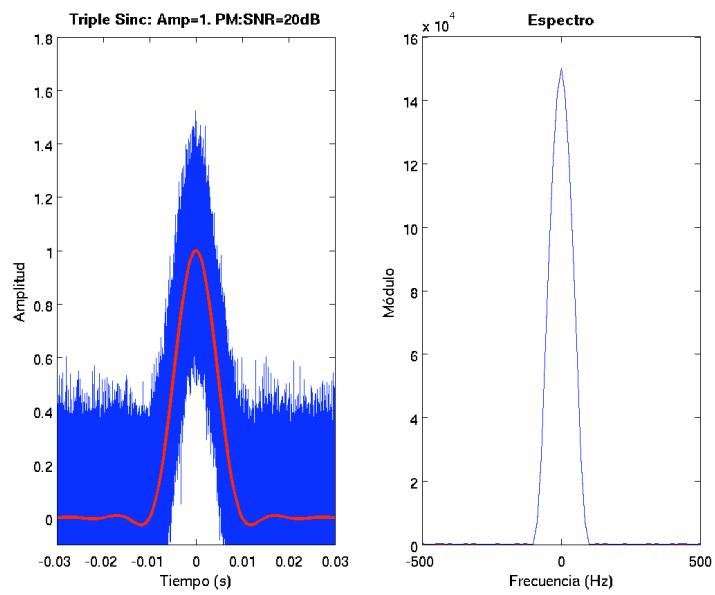


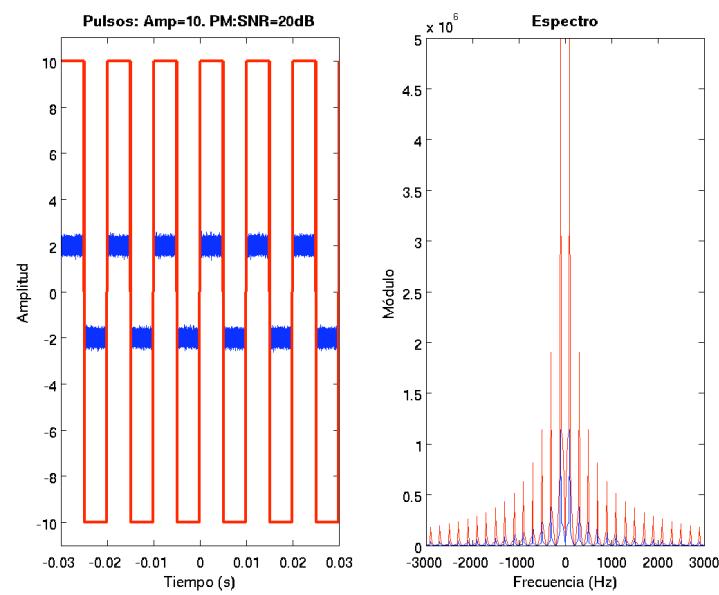
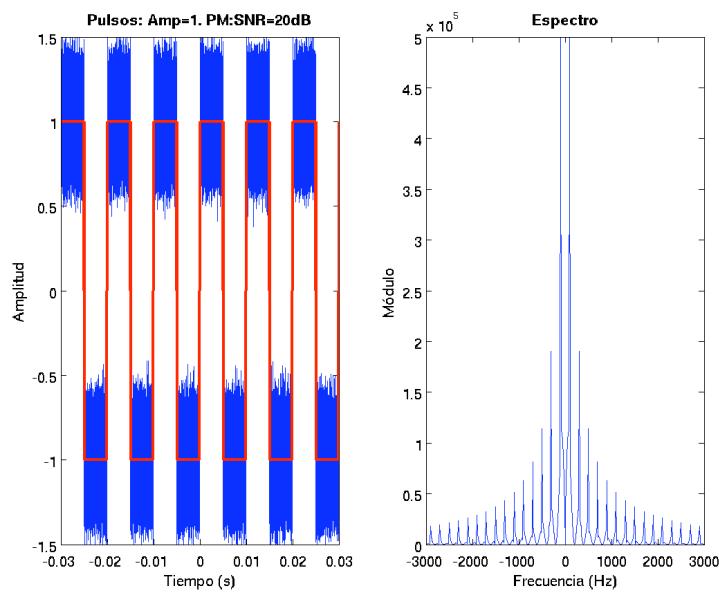


#### 4.2.2.2. MODULACIÓN PM

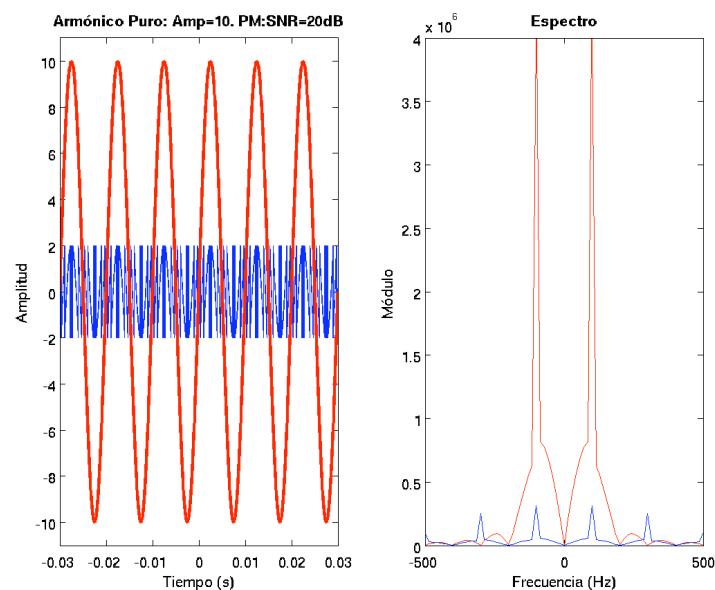
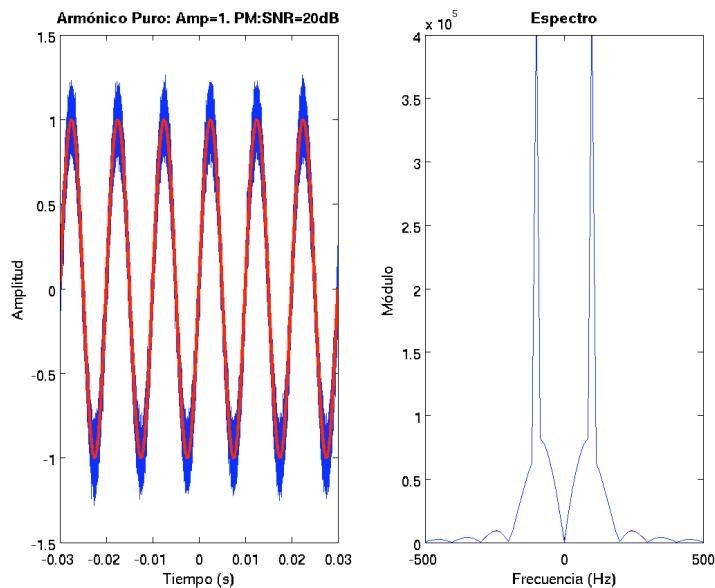
##### a. Desviación en fase: $\pi/4$ .

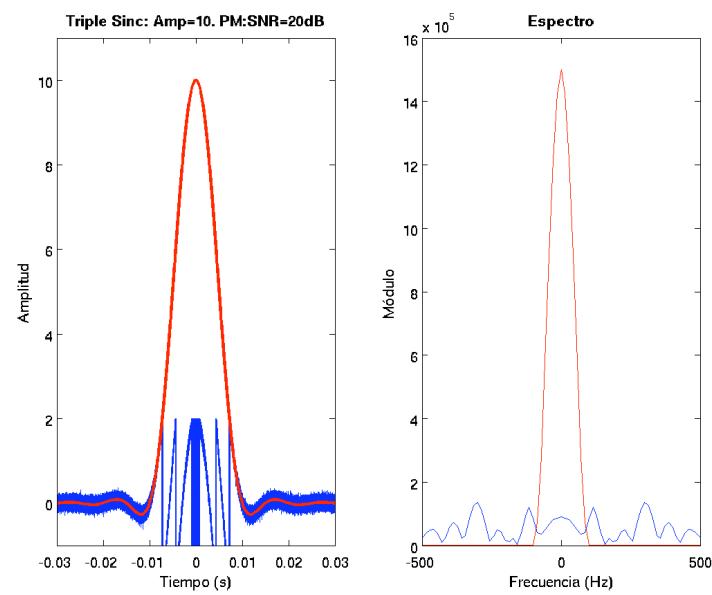
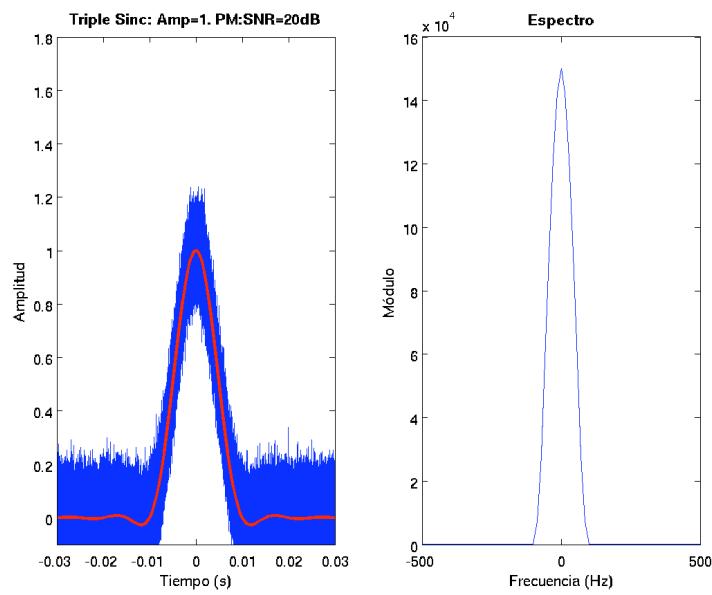


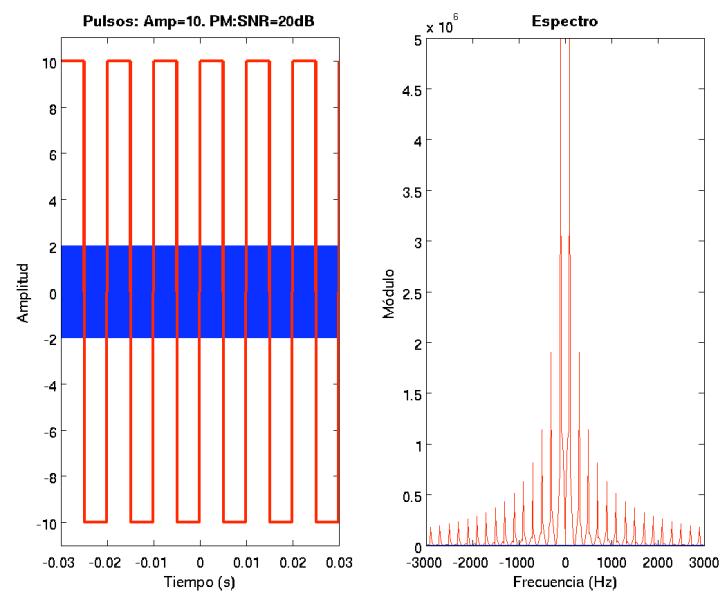
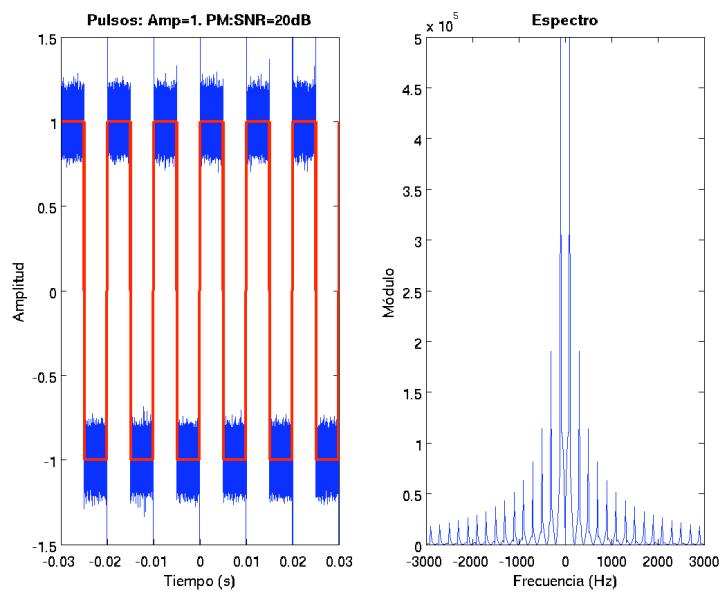




b. Desviación en fase:  $\pi/2$ .







## 5. CONCLUSIONES.-

En base a las representaciones que ilustran los resultados obtenidos tras la simulación propuesta, se pueden establecer las siguientes conclusiones en relación a las siguientes propiedades o características.

En primer lugar, según sea la señal mensaje, la transmisión se verá afectada de diferentes maneras. Cuanto mayor sea la amplitud de la señal mensaje, mayor será la potencia que se envía y, en consecuencia, el ruido que introduce el canal afectará en menor medida a la transmisión, pudiéndose obtener mejores recuperaciones de la señal cuanto mayor sea la amplitud de la señal enviada. A pesar de ello, hay casos en los que, por razones que se desconocen, no es posible recuperar las señales de amplitud 10, mientras que si se recuperan las señales de amplitud 1. En cuanto a lo que respecta al ancho de banda de la señal mensaje, cuanto mayor sea éste, mayor será el ancho de banda de la señal FM, tal y como refleja la regla de Carson. No obstante, en el estudio realizado, puesto que el ancho de banda de las señales moduladoras utilizadas es muy pequeño con respecto a la variación en frecuencia, el ancho de banda de la señal modulada permanece aproximadamente constante.

En lo que se refiere al canal, queda claro que cuanto mayor sea el nivel de ruido que se introduce, más difícil será obtener una señal a la salida que guarde parecido con la señal mensaje que se transmite.

En referencia a las características de las modulaciones, queda constatado que cuanto mayor sea la frecuencia de la señal que se utiliza como portadora más eficiente será la modulación y más inmune será la misma al efecto del ruido. De esta forma, cuanto mayor sera dicha frecuencia, mayor parecido guardará la señal recuperada con la señal mensaje. Además, en el caso de modulación FM, cuanto mayor sea la desviación en frecuencia utilizada, mejores resultados frente al ruido se obtendrán. En este punto hay que tener cuidado, ya que el aumento de desviación en frecuencia y, como consecuencia, del ancho de banda de la señal modulada puede hacer que, superado el umbral que viene dado por  $\gamma_{umbral} = 20(\beta + 2)$ , el efecto del ruido produzca que la SNR se empeore en lugar de mejorarlala. En cuanto a la modulación PM, la desviación en fase de  $\pi/2$  arroja mejores resultados que la desviación de  $\pi/4$ , ya que una mayor desviación de fase hace que el ancho de banda de la señal modulada tenga un mayor ancho de banda.

Por último, hay que decir que tanto PM como FM tienen un comportamiento similar, algo que viene motivado por el hecho de que ambas modulaciones son inseparables y completamente similares. A pesar de ello, PM presenta un comportamiento mejor que FM en las situaciones en las que el pico de la señal mensaje es superior al pico de su derivada, es decir, cuando la PSD de la señal tiene la energía concentrada en bajas frecuencias. Éste es el caso de la señal triple sinc. Por el contrario, FM es superior a PM cuando ocurre el caso contrario, tal y como ocurre en los ejemplos de las señales senoidal y de pulsos.

## 6. MODULACIÓN LINEAL VS MODULACIÓN ANGULAR.-

Si se comparan los resultados obtenidos en el estudio de modulación lineal y los obtenidos en éste puede verse que, en casi todos los casos, la modulación lineal ofrece mejores resultados que la modulación angular. Este es un hecho que contradice totalmente la teoría, puesto que FM y PM tienen que mostrar una mayor inmunidad ante el ruido. Es probable que los resultados erróneos se produzcan por el hecho de que las frecuencias de portadora utilizadas, 100 kHz y 1 MHz, sean demasiado pequeñas, ya que no permiten que la desviación en frecuencia de las señales moduladas de forma angular sea grande. De esta forma, las señales FM y PM utilizan un ancho de banda reducido como consecuencia de la poca desviación en frecuencia que sufren y, por tanto, no pueden obtener buenos valores de SNR puesto que no se tiene un ancho de banda lo suficientemente alto.

Lo que si queda claro tras comparar los dos estudios realizados es que la modulación SSB ofrece los mejores resultados en cuanto a ancho de banda. Además, también se demuestra que la implementación de la modulación AM es, con diferencia, la más simple y, por tanto, barata; mientras que la demodulación SSB es la más costosa de implementar.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Lathi, *Modern Digital And Analog Communication Systems*

[2] Matlab, *Ayuda general de Matlab.*