

Trabajo opcional tema 2: transmisión paso

Alberto Mateos Checa

I. Telecomunicación

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

1. Introducción.-	3
2. Diseño.-	3
<i>2.1. Sistema completo.-</i>	3
<i>2.2. Equivalentes banda base de las respuestas al impulso del canal.-</i>	4
3. Implementación.-	5
3.1. Elementos de simulación.-	5
<i>3.1.1. Señales de entrada.-</i>	5
<i>3.1.2. Filtros para conversión a banda base.-</i>	8
<i>3.1.3. Filtros para modelado del canal.-</i>	9
3.2. Implementación en Matlab.-	10
4. Resultados.-	12
4.1. Transmisión sin efecto de canal.-	12
4.2. Transmisión a través del canal.-	15
<i>4.2.1. Canal intermedio (BP: 5 kHz – 15 kHz)</i>	15
<i>4.2.2. Canal estrecho (BP: 9 kHz – 11 kHz)</i>	23
<i>4.2.2. Canal ancho (BP: 2 Hz – 20 kHz)</i>	30
5. Conclusiones.-	37
Bibliografía	37
Apéndice A: representación de las señales de salida.-	38
<i>A.1. Canal intermedio (BP: 5 kHz – 15 kHz)</i>	38
<i>A.2. Canal estrecho (BP: 9 kHz – 11 kHz)</i>	59
<i>A.3. Canal ancho (BP: 2 Hz – 20 kHz)</i>	80

1. INTRODUCCIÓN.-

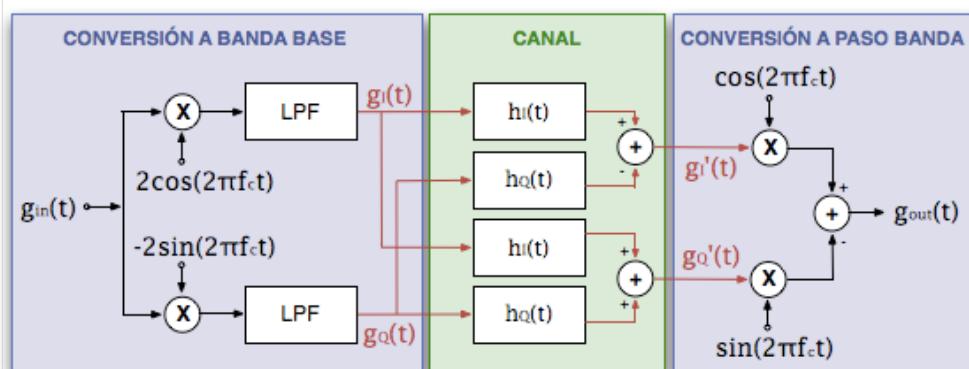
Una forma práctica y sencilla de estudiar la transmisión de señales a través de canales paso banda es mediante la representación canónica de las señales paso banda y de los canales. Con este método, mediante una serie de operaciones simples, se pueden obtener representaciones complejas en banda base que son equivalentes a las señales paso banda. De la misma forma, se pueden obtener canales en banda base equivalentes a los paso banda.

Una vez que se obtiene las representaciones equivalentes en banda base se puede aplicar la teoría propia de éstos para posteriormente volver a pasar al dominio de paso banda y obtener los resultados esperados. De esta forma, el tratamiento de señales paso banda se simplifica de forma ostensible ya que el análisis de señales en banda base es mucho menos complejo que el de señales paso banda.

2. DISEÑO.-

2.1. SISTEMA COMPLETO.-

Para la realización del estudio se utiliza la configuración que se propone en el apéndice 2.4. de [1], de forma que el siguiente esquema ilustra el sistema completo a utilizar:



Nota: las líneas que se muestran en rojo representan el paso de señales en banda base.

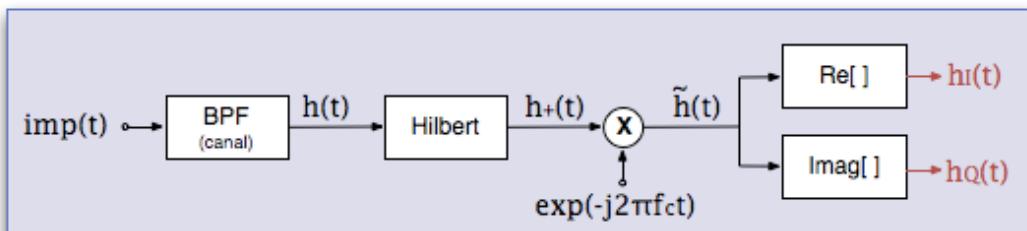
Como puede apreciarse en el esquema anterior, lo primero que se hace es hallar las señales equivalentes en banda base $g_I(t)$ (equivalente In-phase) y $g_Q(t)$ (equivalente Quadrature). Para ello será necesario un filtro paso baja con ancho de banda W y un oscilador a frecuencia f_c , suponiendo que la señal de entrada al sistema sea una señal paso banda con ancho de banda $2W$ centrada en f_c .

El siguiente módulo del sistema trata de evaluar el efecto del canal. Para ello, es necesario obtener las representaciones equivalentes en banda base de la respuesta al impulso del filtro que va a modelar el efecto del canal, es decir, h_I y h_Q . Una vez obtenidas las respuestas al impulso equivalentes, habrá que convolucionar las señales entrantes g_I y g_Q con las respuestas equivalentes del filtro y realizar las sumas y restas que se indican en el esquema. De esta forma, se obtendrán a la salida las señales g'_I y g'_Q , que representan las equivalentes en banda base de la señal g_{in} una vez atravesado el canal. Hay que destacar que las señales que salen del bloque del canal tiene amplitud doble de la que se muestra, por lo que, aunque no se especifica en el esquema con el objetivo de que éste incluya únicamente los bloques fundamentales, hay que dividir por dos la amplitud de las mismas.

Por último, a la salida se encuentra el módulo que convierte las equivalentes en banda base a paso banda, obteniéndose la señal resultado de atravesar el canal $g_{out}(t)$. Esta conversión es muy parecida a la que se realiza para pasar a banda base, no siendo necesario el uso de filtros.

2.2. EQUIVALENTES BANDA BASE DE LAS RESPUESTAS AL IMPULSO DEL CANAL.-

Como se vio en el apartado anterior, en el módulo que aplica el efecto del canal a las señales se utilizan las equivalentes en banda base de las respuestas al impulso del filtro que modela el canal en cuestión. Para hallar dichas equivalentes se utiliza el siguiente sistema:



Tal y como puede verse en la figura, lo primero que se hace es obtener la respuesta al impulso $h(t)$ del filtro que representa al canal introduciendo una señal impulso. Posteriormente, mediante la función Hilbert se obtiene la señal analítica o pre-envolvente. Hay que destacar en este punto que la función Hilbert que ofrece Matlab proporciona de forma directa la señal analítica y no la transformada de Hilbert de la señal, por lo que se simplifica el sistema.

El siguiente paso es obtener la señal envolvente compleja $\tilde{h}(t)$ multiplicando por una exponencial compleja negativa, de forma que se cumple que $h_+(t) = \tilde{h}(t) \cdot e^{j2\pi f_c t}$.

Por último, bastará con tomar la parte real e imaginaria para obtener las respuestas equivalentes al impulso en banda base $h_I(t)$ y $h_Q(t)$ respectivamente.

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.

Hay que puntualizar que, debido a la gran cantidad de operaciones que se realizan y a que los vectores que almacenan las señales involucradas son de gran tamaño, la ejecución puede tardar varias horas en completarse con éxito.

3.1. ELEMENTOS DE SIMULACIÓN.-

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

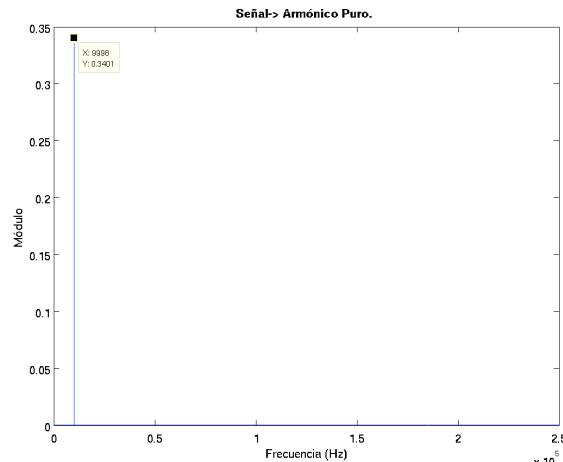
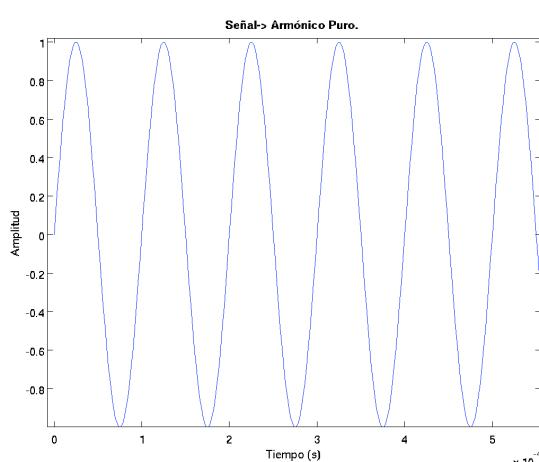
3.1.1. SEÑALES DE ENTRADA.-

El programa desarrollado contempla siete señales diferentes a transmitir a través del canal. La generación de todas las señales se produce mediante la llamada a la función **generacion.m**. Todas ellas están centradas en frecuencia en 10 kHz. Además, 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 500 kHz. Es por ello que, tal y como se comentaba anteriormente, el tratamiento de dichas señales es costoso computacionalmente.

Las señales de entrada al sistema analizadas son las siguientes:

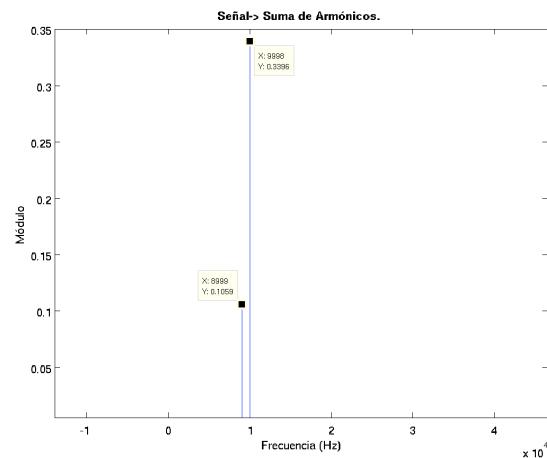
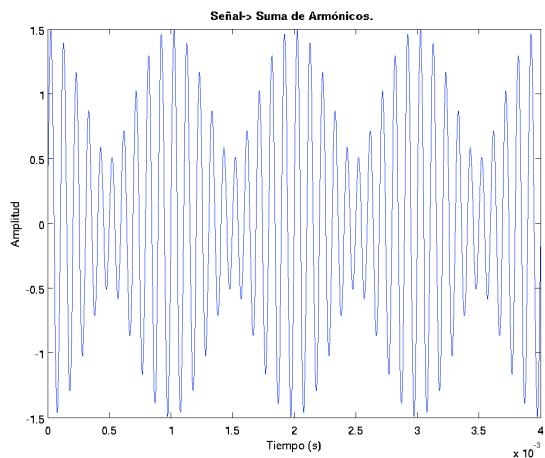
a. Armónico puro.

Se trata de una señal senoidal de frecuencia 10 kHz y desfase nulo. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



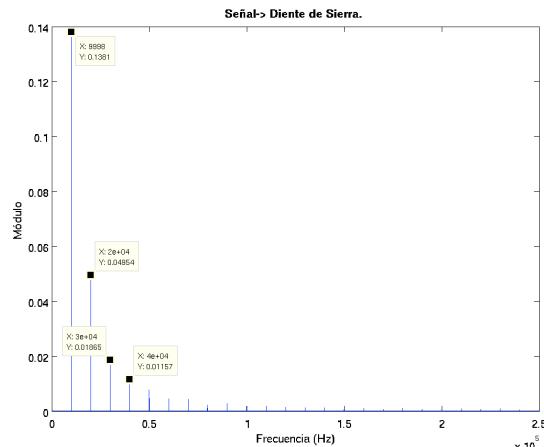
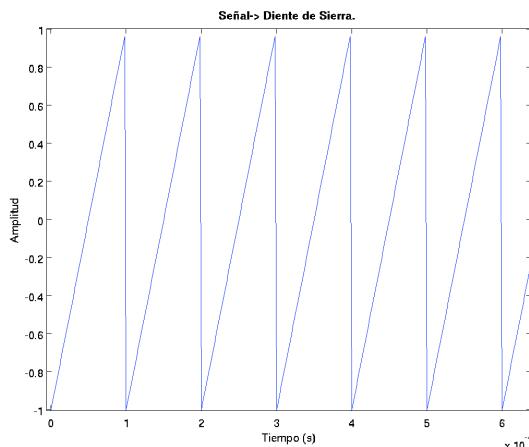
b. Suma de armónicos.

Se trata de una señal resultado de sumar una señal senoidal de amplitud unidad y frecuencia 10 kHz y una señal senoidal con la mitad de amplitud y frecuencia de 9 kHz. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



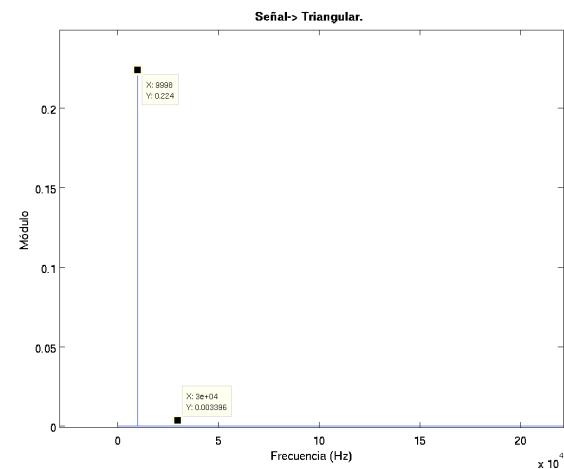
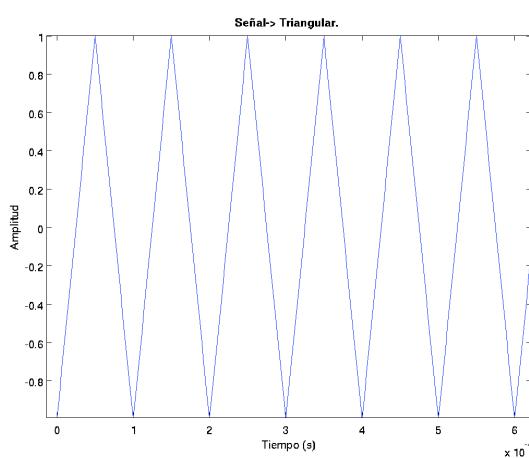
c. Diente de sierra.

Se trata de una señal de tipo diente de sierra de frecuencia 10 kHz y desfase nulo. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



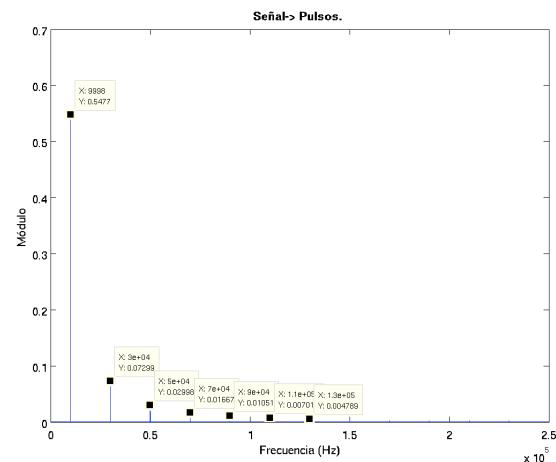
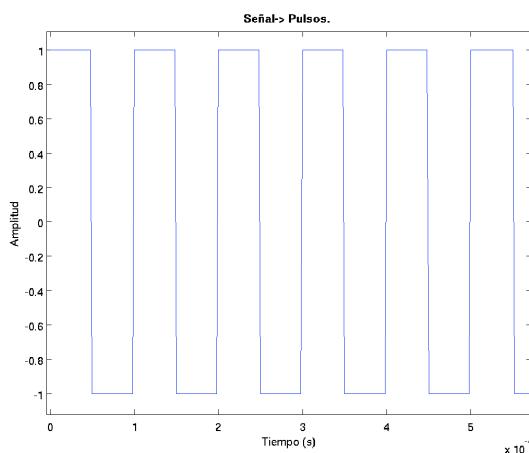
d. Triangular.

Se trata de una señal con forma de onda triangular de frecuencia 10 kHz y desfase nulo. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



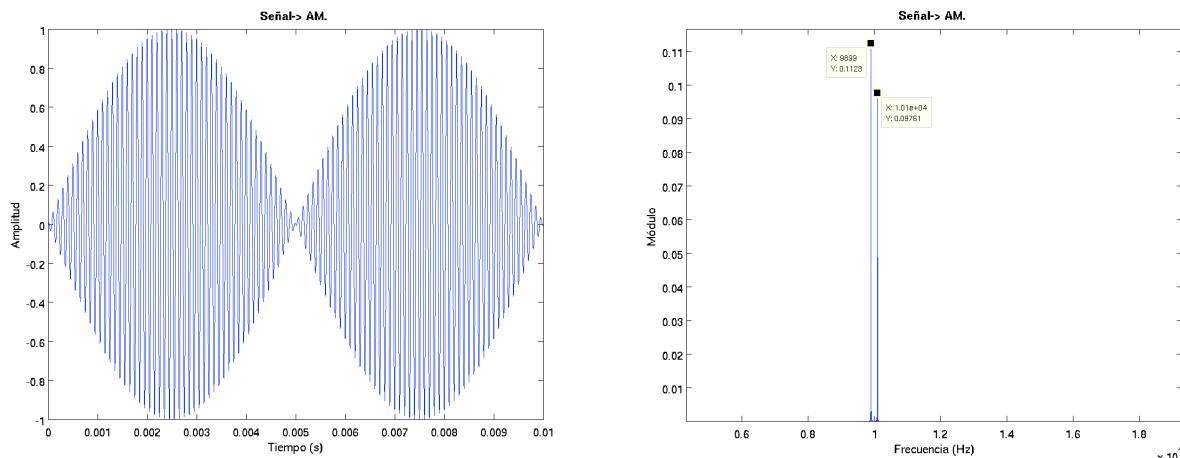
e. Pulso.

Se trata de una señal de pulsos cuadrados de frecuencia 10 kHz y desfase nulo. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



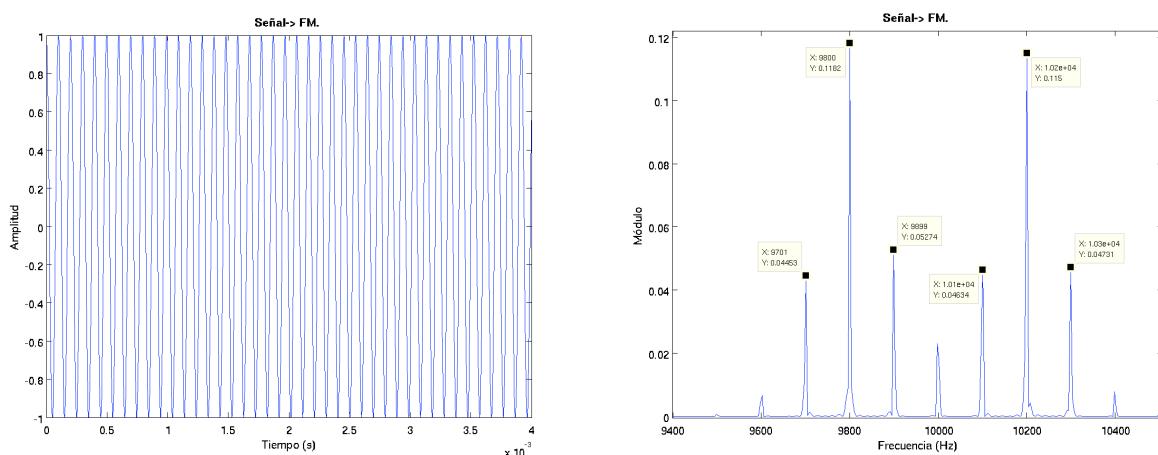
f. Señal modulada AM.

Se trata de una señal modulada mediante modulación de tipo AM cuya señal portadora es una señal senoidal de 10 kHz. En cuanto a la señal moduladora, se trata de una señal senoidal de frecuencia 100 Hz. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



g. Señal modulada FM.

Se trata de una señal modulada mediante modulación de tipo FM cuya señal portadora es una señal senoidal de 10 kHz. En cuanto a la señal moduladora, se trata de una señal senoidal de frecuencia 100 Hz. A continuación se muestran tanto su forma de onda como su espectro:



3.1.2. FILTROS PARA CONVERSIÓN A BANDA BASE.-

Tal y como se ha podido comprobar en el apartado anterior en el que se mostraban la forma de onda y espectro de las señales que se van a transmitir por el canal paso banda, cada una de ellas posee un espectro y ancho de banda diferente. Es por ello que se hace necesario utilizar un filtro apropiado para cada caso en la etapa de conversión de las señales de paso banda a equivalente en banda base ya que, como se indicó en el diseño, el filtro debe tener una banda de paso de anchura W suponiendo que la señal tiene un ancho de banda de $2W$. Así, aunque todos los filtros utilizados son del tipo paso bajo, cada uno de ellos tiene una frecuencia de corte acorde con la señal que va a filtrar.

Por otro lado, con objeto de idealizar el comportamiento de los filtros utilizados en la conversión y debido a que Matlab no implementa el uso de filtros ideales, se han utilizado filtros del tipo Butterworth de orden 30 ya que éstos no tienen rizado en la banda de paso y, en dicha zona, su respuesta en frecuencia permanece casi constante en la mayoría de los casos. Al usar un orden tan alto se pretende que la caída del filtro sea muy abrupta, de forma que se acerque al comportamiento de un filtro paso bajo ideal.

Además, el diseño de todos los filtros utilizados en la simulación, incluyendo los que modelan el canal, se ha realizado mediante la herramienta **FDATool** de Matlab. Una vez diseñados los filtros, son incluidos en la simulación mediante la llamada a la función **filtrosConversor.m**

Seguidamente se muestra una tabla que recoge las frecuencias de corte utilizadas por el filtro Butterworth de orden 30 para cada una de las señales:

Tipo de señal	Frecuencia de corte (Hz)
Armónico puro	1
Suma de armónicos	1100
Diente de sierra	40100
Triangular	20100
Pulsos	40100
AM	101
FM	401

Es fácil darse cuenta de que las señales de tipo diente de sierra, triangular y pulsos cuadrados son filtradas con un filtro cuya frecuencia de corte es muy grande. De hecho, es más grande aun que la frecuencia a la que están centradas. Esto se debe a que dichas señales no son señales paso banda ya que sus armónicos se repiten hasta el infinito. Por esta razón, ya desde la fase de conversión estas señales serán distorsionadas y será difícil recuperar su forma de onda puesto que se está limitando su ancho de banda. Dicho efecto podrá notarse de forma aun más pronunciada para las señales diente de sierra y de pulsos cuadrados.

Para un mayor detalle pueden consultarse los modelos de los filtros, que están adjuntados a este archivo en formato legible mediante la herramienta FDATool de Matlab. Por tanto, es posible visualizar sus respuestas en módulo y fase, así como su respuesta al impulso y escalón y otros parámetros.

3.1.3. FILTROS PARA MODELADO DEL CANAL.-

Como ya se ha comentado con anterioridad, el efecto del canal se va a modelar mediante un filtro de tipo paso banda. Con el fin de estudiar diferentes efectos del canal sobre la transmisión de señales se han diseñado filtros con diferentes anchos de banda y orden y mediante diferentes métodos de diseño.

El siguiente gráfico muestra los distintos tipos de filtros utilizados en la simulación para modelar el canal:

BW	5 kHz - 15 kHz					9 kHz - 11 kHz					2 Hz - 20 kHz				
	Butterworth	Chebyshev	Elíptico	Butterworth	Chebyshev	Elíptico	Butterworth	Chebyshev	Elíptico	Butterworth	Chebyshev	Elíptico	Butterworth	Chebyshev	Elíptico
Tipo	2	4	10	2	4	10	2	4	10	2	4	10	2	4	10
Orden	2	4	10	2	4	10	2	4	10	2	4	10	2	4	10

De esta forma, se han utilizado tres anchos de banda diferentes, un intermedio (5-15 kHz), uno estrecho (9-11 kHz) y uno muy amplio (2 Hz - 20 kHz) que casi puede ser considerado de tipo paso bajo.

Para cada uno de los anchos de banda se han diseñado tres tipos de filtros: Butterworth, Chebyshev y elíptico, de forma que cada uno de ellos, aun teniendo mismo ancho de banda que los demás, afectará de forma

diferente a las señales en función de las características propias de cada uno. Además, para cada tipo de filtro se han realizado versiones de órdenes 2, 4 y 10.

Por tanto, en vista de lo anterior, se han utilizado 27 filtros diferentes para el modelado del canal. Los modelos de los filtros se adjuntan a este archivo en formato legible mediante la herramienta FDATool de Matlab. Por tanto, es posible visualizar sus respuestas en módulo y fase, así como su respuesta al impulso y escalón y otros parámetros.

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 el resultado de la simulación en la matriz *signalsBanda*. 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*) 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 obtienen las representaciones equivalentes en banda base mediante una llamada a la función **bandaAcuadratura.m**. A esta función se le pasa la matriz que contiene las señales. Dichas señales se multiplican por los osciladores y se filtran tal y como se indicó en los esquemas de la sección de diseño de este documento. De esta forma, las señales equivalentes quedan almacenadas en la matriz *signalsCuadratura*. Esta matriz tiene el doble de filas que la matriz *signals* y almacena en las primeras siete filas las señales equivalentes In-phase y en las segundas siete filas las señales equivalentes en cuadratura.

Posteriormente se obtienen las respuestas equivalentes al impulso en banda base de cada uno de los filtros que se van a utilizar para modelar el canal. Ésto se realiza mediante la función **filtros.m**, que devuelve dos matrices (*respuestasInphase* y *respuestasCuadratura*) que contienen en cada fila la respuesta In-phase y en cuadratura respectivamente.

A continuación se procede a la simulación del canal. Puesto que se tienen 27 canales diferentes, la simulación se realiza mediante iteraciones, de manera que en cada iteración se utiliza un filtro diferente. Como puede comprobarse en el código, dichas iteraciones no se han realizado mediante un bucle. Esto se debe a que, tras cada simulación, se ha guardado de forma manual el workspace para un posterior procesado. Aunque es algo laborioso puesto que hay que hacer 27 ejecuciones manualmente, es una forma de implementación “segura”, pues se van almacenando los datos para todas las iteraciones y se evita perder el tiempo en caso de que en alguna de las iteraciones se produce un error (recordemos que la simulación completa puede tardar varias horas).

Para la simulación del efecto del canal sobre las señales se realizan diferentes llamadas a la función **canal.m**. Tras pasarse las representaciones en fase y cuadratura de las señales y de la respuesta al impulso del filtro a simular a esta función, se devuelve el resultado en la matriz *signalsCanal*, de forma que en la mitad superior de la misma estarán las equivalentes en fase y en la inferior las equivalentes en cuadratura. Para evaluar el efecto del canal se realizan las convoluciones y operaciones que se muestran en el diagrama del sistema (apartado de diseño). Hay que decir que, por efecto de las operaciones de convolución que se realizan, las señales devueltas tienen el doble de muestras que las que se introducen. Es por ello que, para obtener un resultado correcto, se desecha la primera mitad de las muestras.

Tras evaluar el efecto del canal, se procede a la obtención de las señales resultantes paso banda a partir de sus equivalentes en banda base. Para tal fin se hace uso de la función **cuadraturaAbanda.m**. Esta función realiza las operaciones que se expusieron anteriormente para obtener las señales resultado de la transmisión de las señales a través de un canal paso banda modelado por el filtro k. El resultado de la conversión es almacenado en la matriz *signalsBanda*.

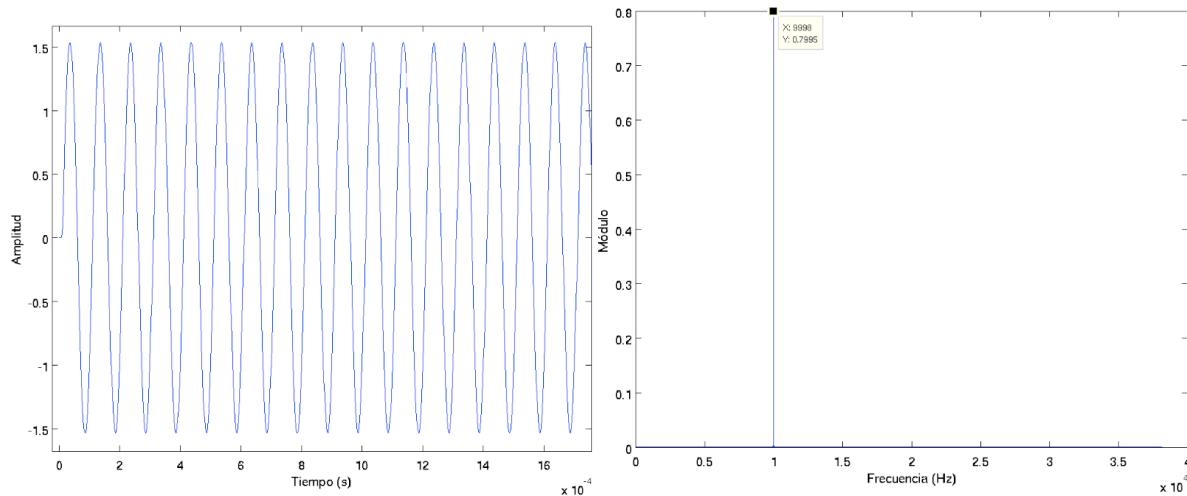
Por último, una vez realizadas todas las simulaciones de transmisión, se realiza una última simulación suponiendo que el canal no afecta en absoluto en el proceso. De esta forma, se obtienen en la matriz *signalsNoCanal* los resultados de convertir las señales originales a banda base y volver a convertir estas últimas a paso banda.

4. RESULTADOS.-

4.1. TRANSMISIÓN SIN EFECTO DE CANAL.-

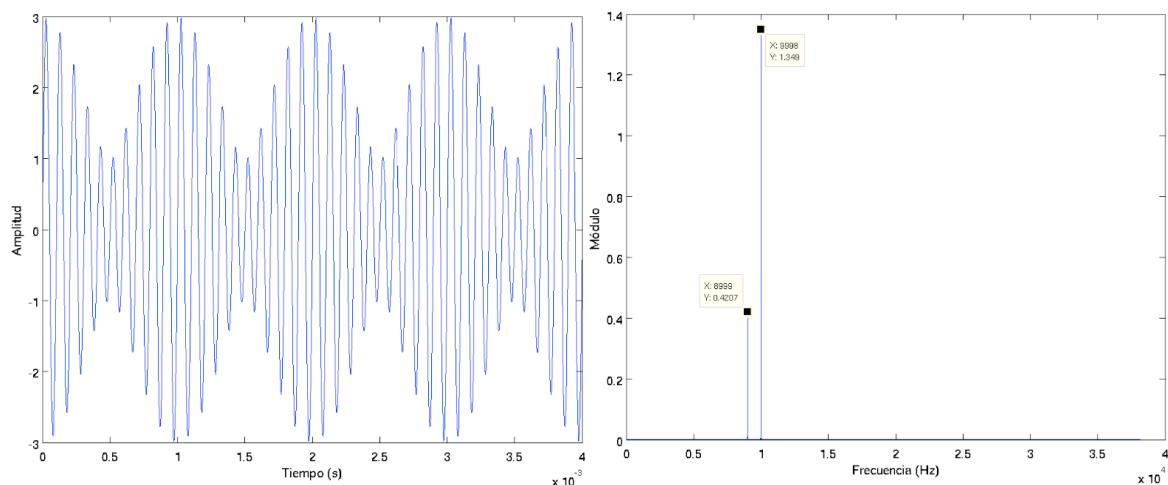
Antes de exponer los resultados obtenidos para cada tipo de canal, se va a proceder a mostrar qué efecto realiza sobre las diferentes señales las conversiones y operaciones realizadas. De esta forma, las señales, cuyas forma de onda y espectro se muestran a continuación, son el resultado de obtener sus equivalentes en banda base y pasar de nuevo a paso banda.

a. Armónico puro.



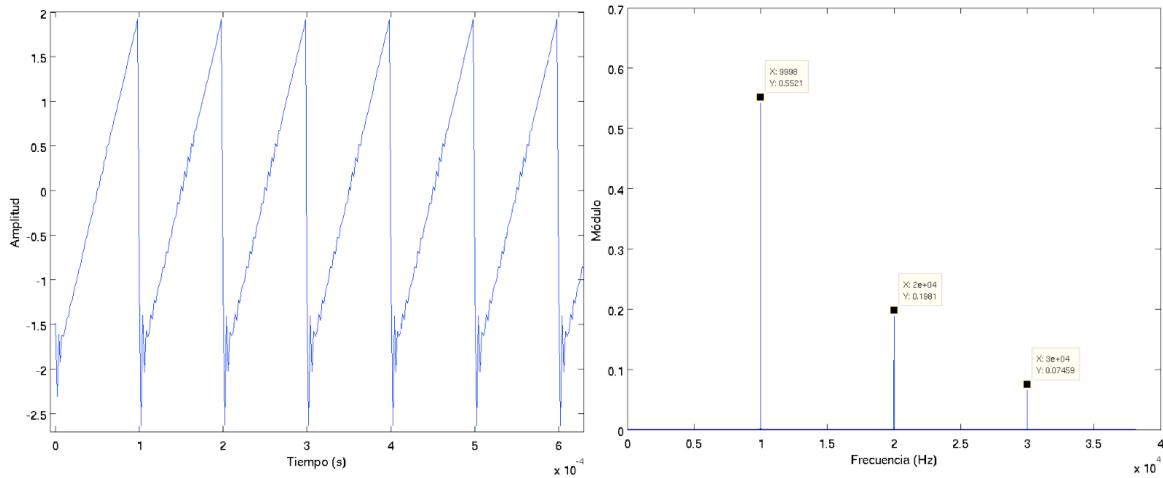
Como puede verse, la forma de onda es exacta a la inicial con la excepción de que la amplitud de la señal ha pasado a ser de 1,5 cuando inicialmente era de 1. Además, el espectro casi ha doblado su energía.

b. Suma de armónicos.



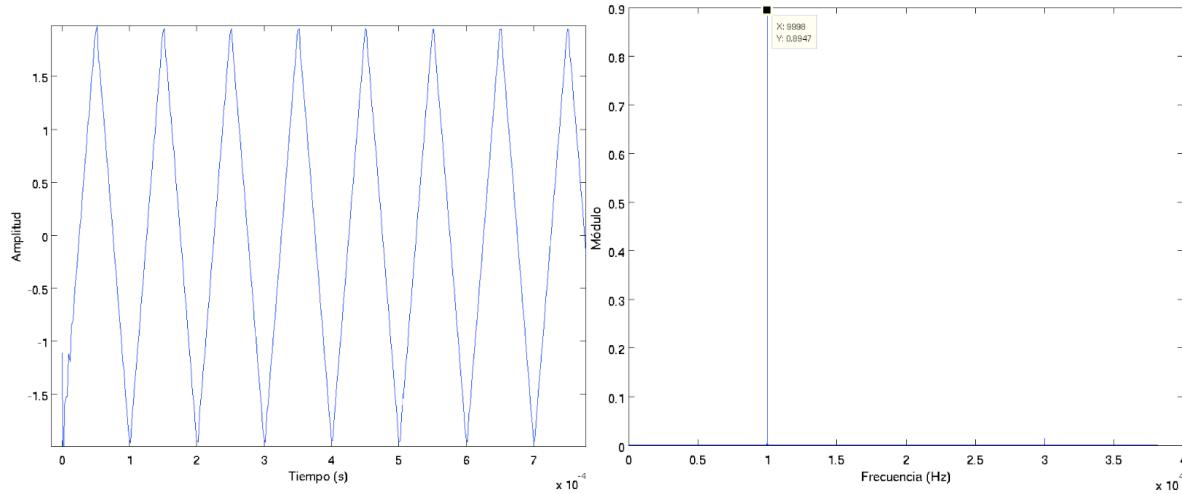
De nuevo la forma de onda es similar a la original pero se ha doblado la amplitud. En cuanto al espectro, también se mantiene aunque aumenta su energía.

c. Diente de sierra.



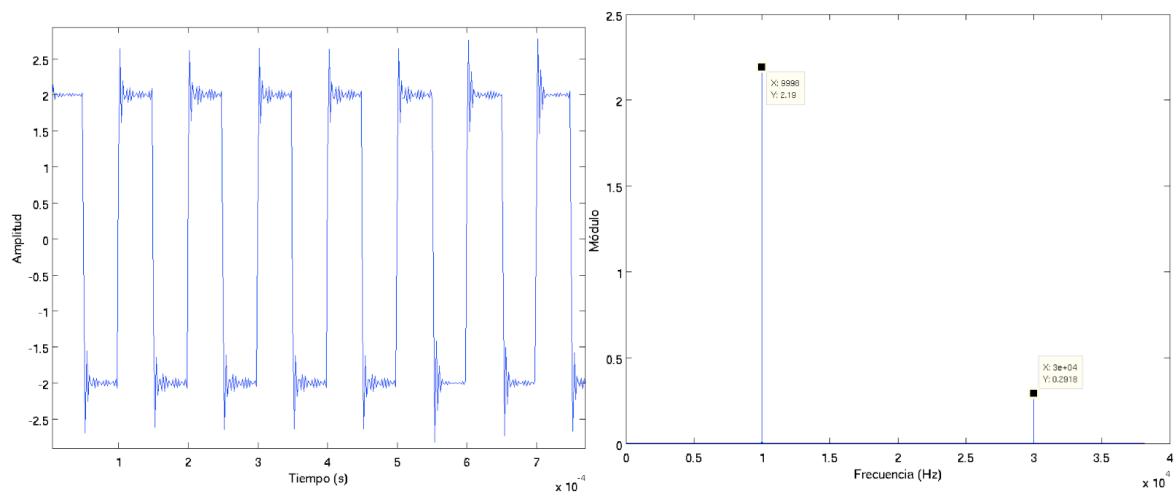
En este caso puede observarse que la forma de onda no es del todo correcta, de forma que incluye distorsiones y su amplitud ha aumentado. Es destacable la aparición de picos en la parte inferior de la forma de onda. Además, el espectro de la señal contiene un menor número de armónicos apreciables como efecto del filtrado producido en la conversión a banda base puesto que la señal tiene infinitos armónicos y el filtro posee frecuencia de corte de 40,1 kHz.

d. Triangular.



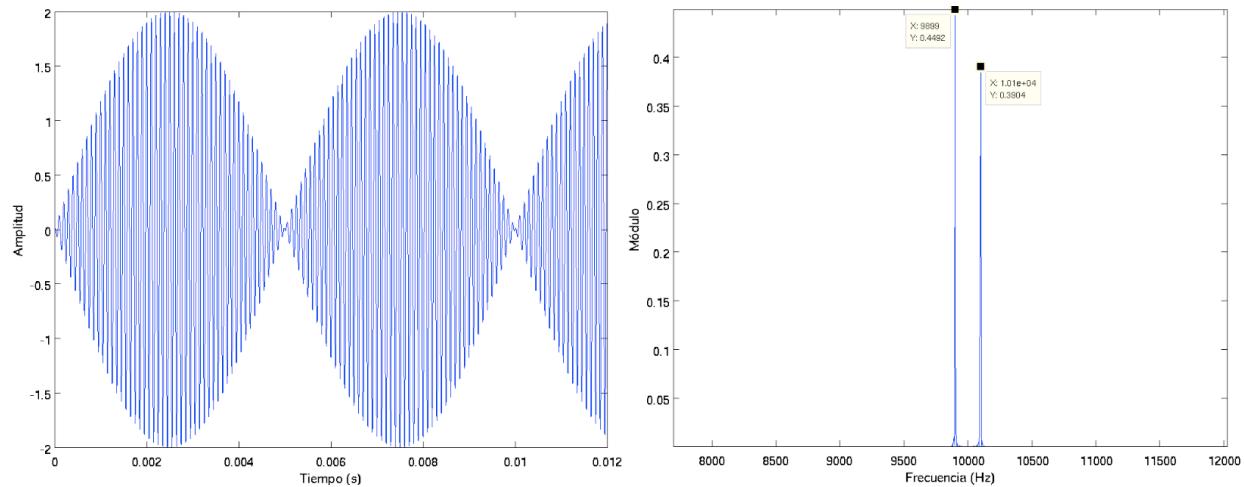
De la misma forma que ocurre con la mayoría de las señales estudiadas, de nuevo aumenta la amplitud de la señal aunque la forma de onda se mantiene. En cuanto al espectro hay que destacar que el armónico que mínimamente contenía la señal original a 30 kHz ahora es inapreciable.

e. **Pulsos.**



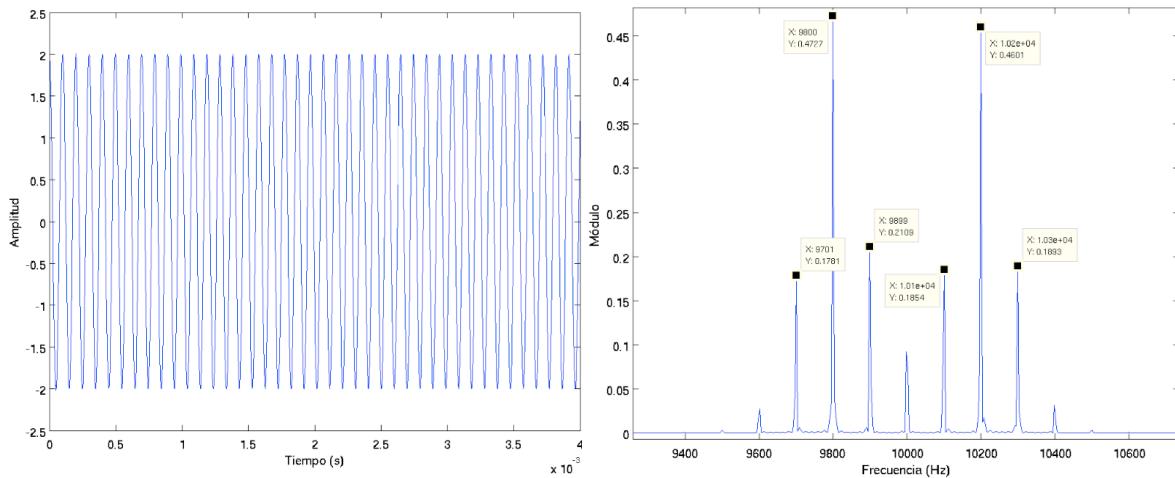
Con esta señal ocurre algo similar a lo que ocurría con la señal diente de sierra. Una señal de pulsos cuadrados contiene infinitos armónicos y, por efecto del filtrado paso bajo realizado, se pierden la mayoría de ellos. Es por esta razón por la que la señal distorsiona su forma y su espectro muestra un menor número de armónicos. Además, la amplitud de la señal también se ha visto modificada. No obstante, la señal es bastante similar a la original en cuanto a forma de onda.

f. **Señal modulada AM.**



Tanto la forma de onda como el espectro son exactamente iguales a los originales a excepción de que la amplitud de la señal se ha doblado y, en consecuencia, la energía presente en la misma es mayor.

g. Señal modulada FM.



Ocurre exactamente igual que con la señal AM, se mantienen la forma de onda y espectro pero se aumenta la amplitud de la señal y, por tanto, la energía de la misma.

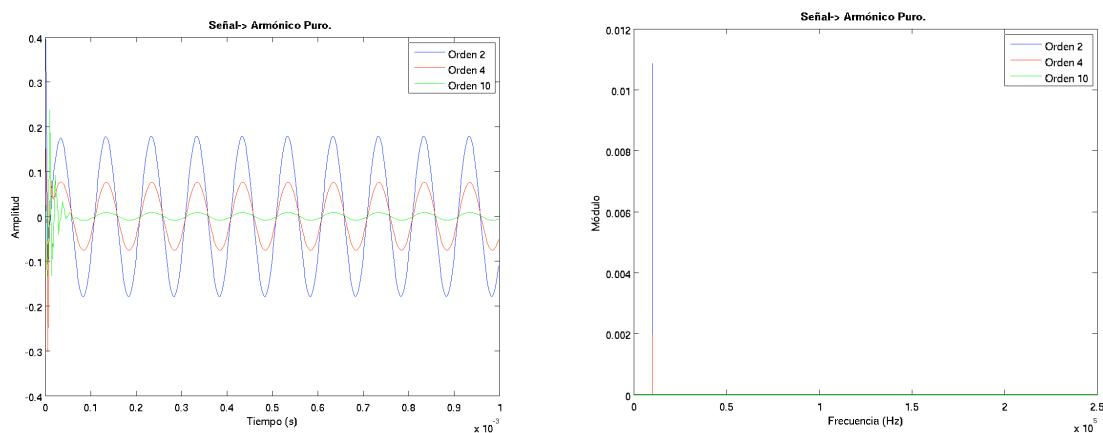
4.2. TRANSMISIÓN A TRAVÉS DEL CANAL.-

En este apartado se van a mostrar las formas de onda y espectros resultado de la transmisión de las señales a través de cada uno de los canales. Se van a mostrar únicamente las gráficas obtenidas para cada tipo de canal y señal, siendo posible obtener un mayor detalle en las gráficas que se presentan en el apéndice A. Posteriormente, en el apartado de conclusiones se analizará el efecto de los canales.

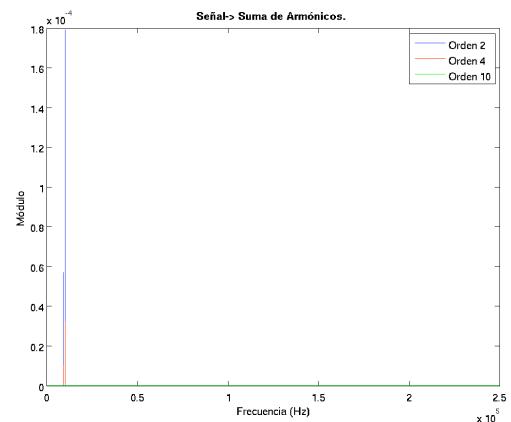
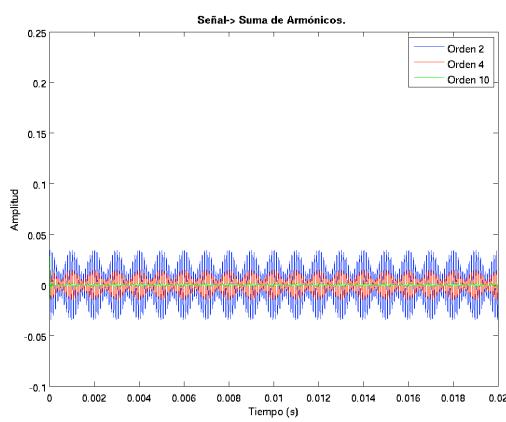
4.2.1. CANAL INTERMEDIO (BP: 5 KHZ – 15 KHZ)

4.2.1.1. FILTRO TIPO BUTTERWORTH

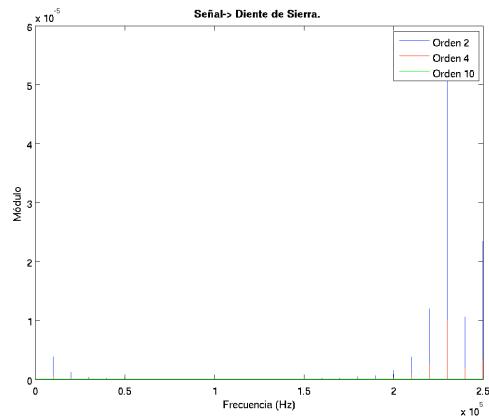
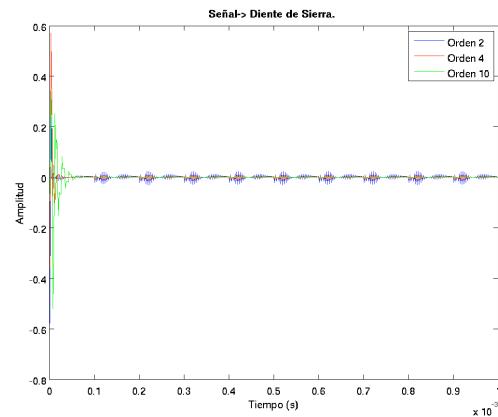
a. Armónico puro.



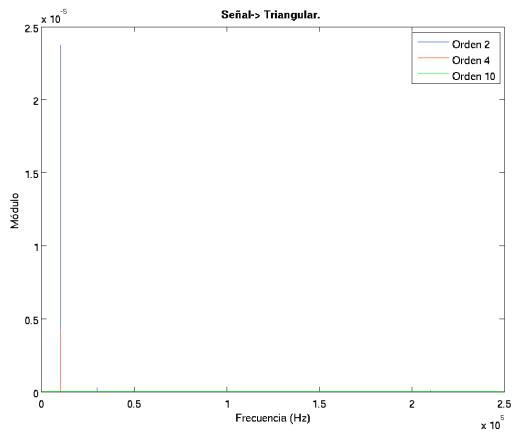
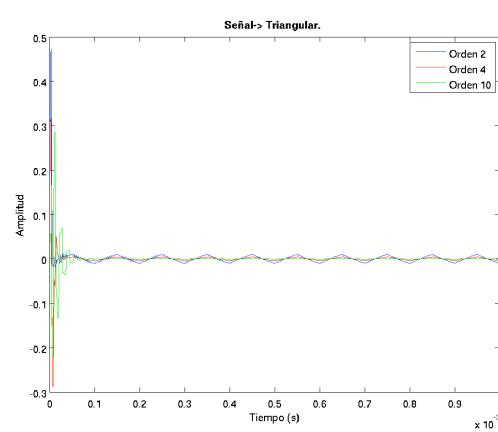
b. Suma de armónicos.



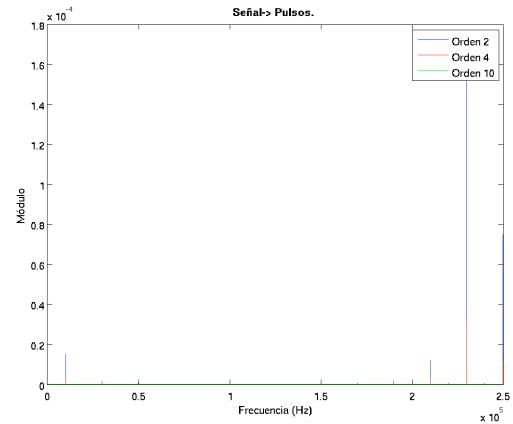
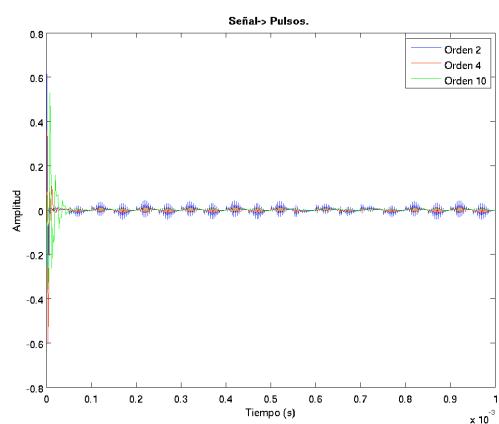
c. Diente de sierra.



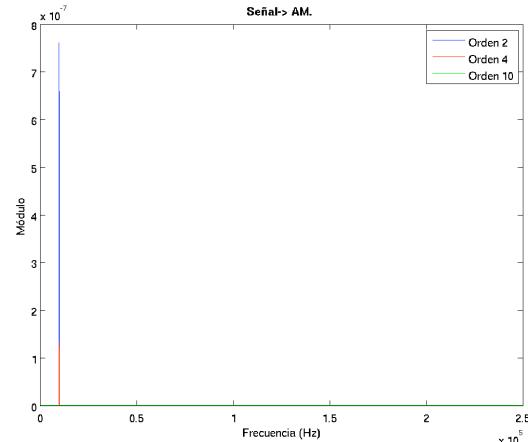
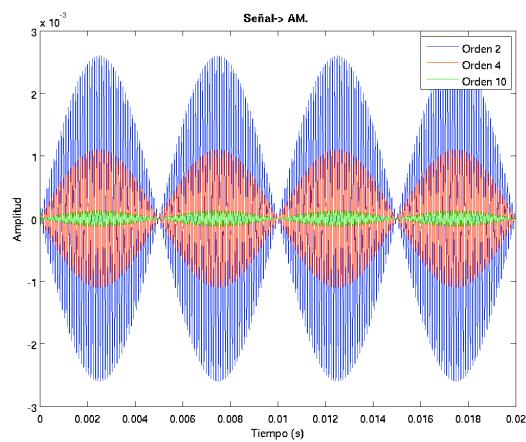
d. Triangular.



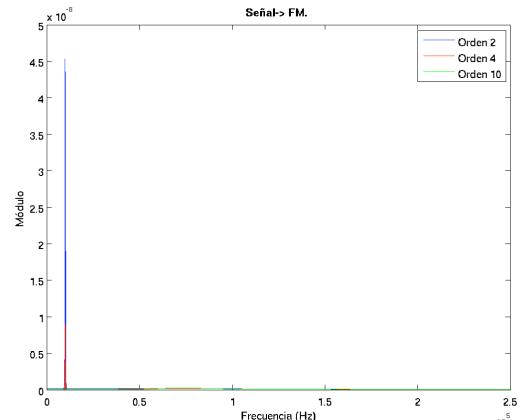
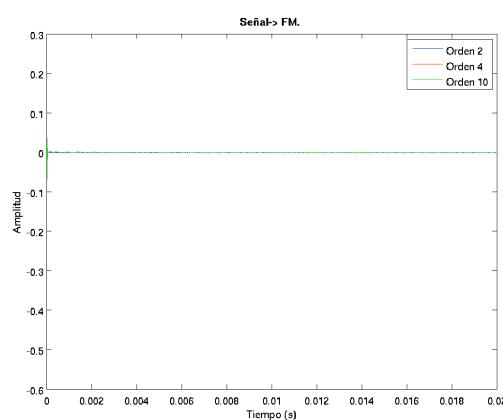
e. **Pulsos.**



f. **Señal modulada AM.**

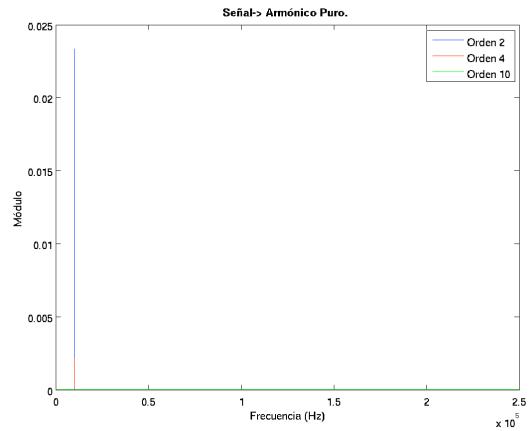
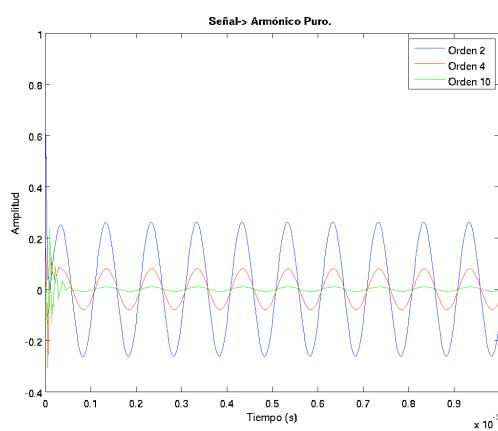


g. **Señal modulada FM.**

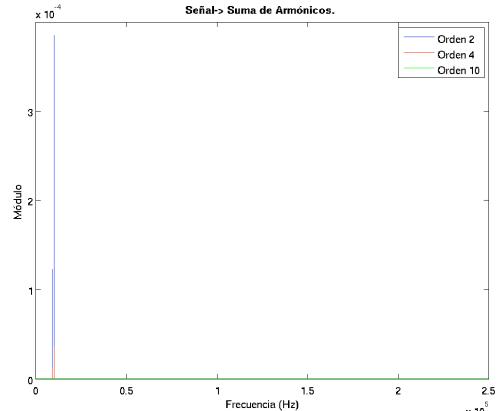
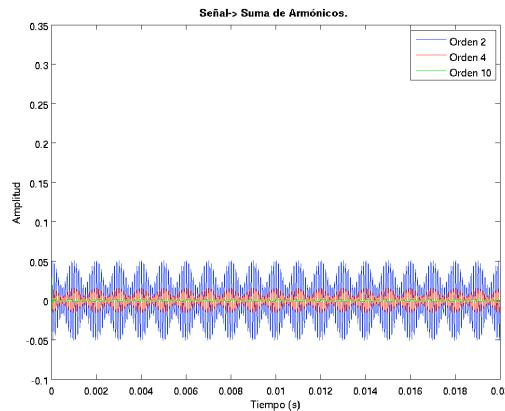


4.2.1.2. FILTRO TIPO CHEBYSHEV

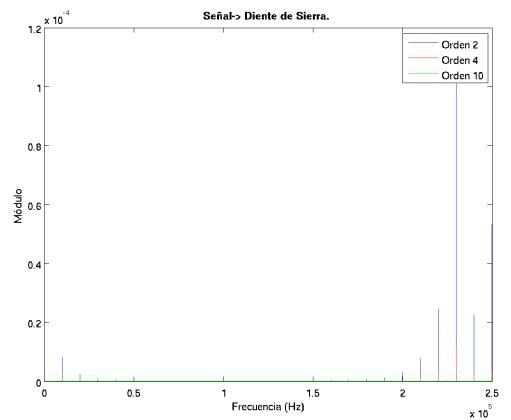
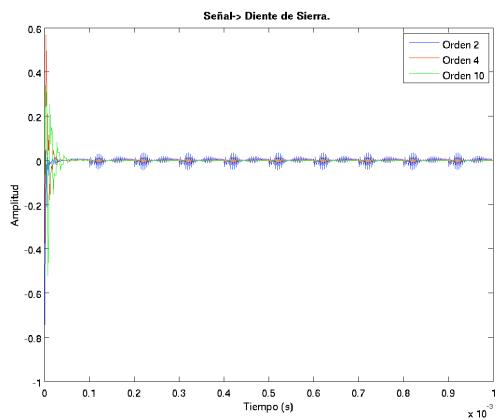
a. Armónico puro.



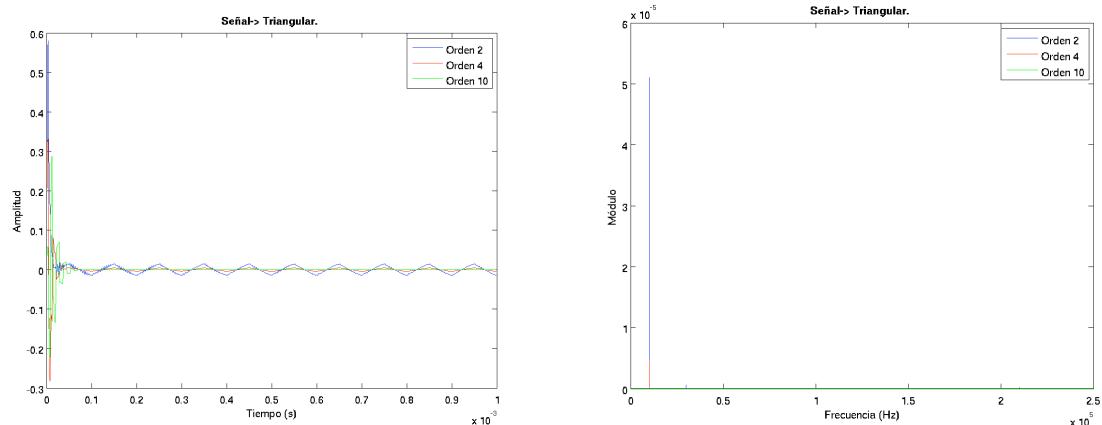
b. Suma de armónicos.



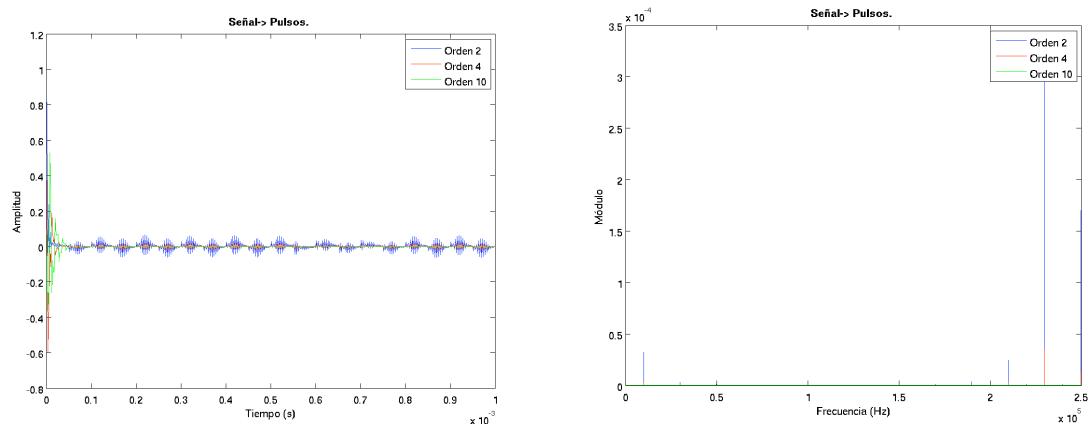
c. Diente de sierra.



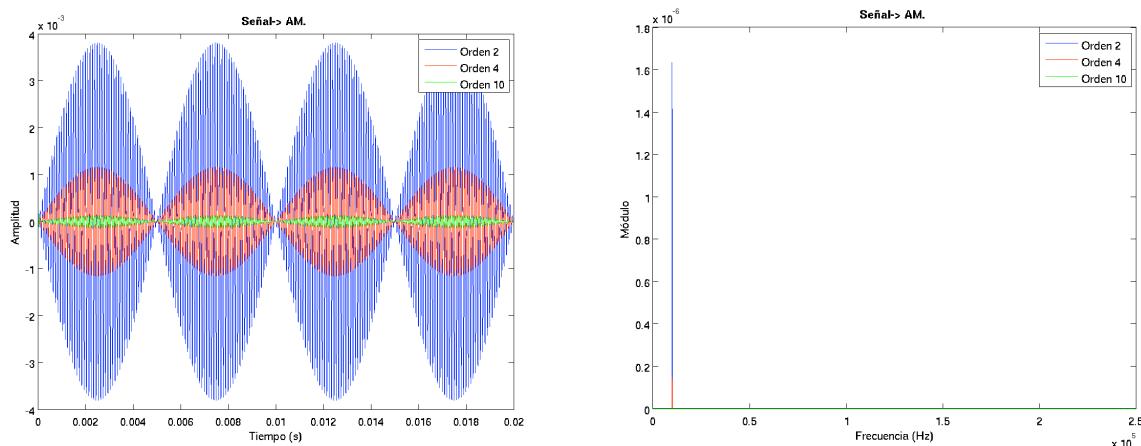
d. Triangular.



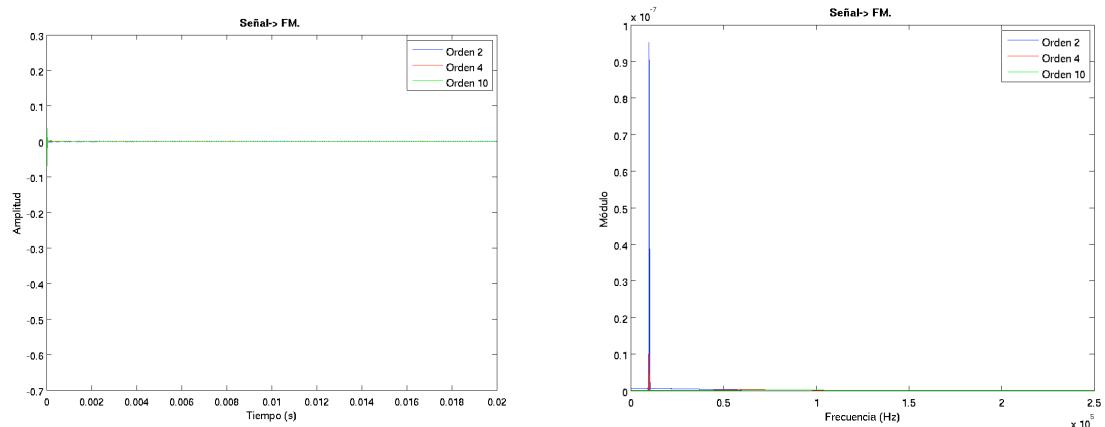
e. Pulses.



f. Señal modulada AM.

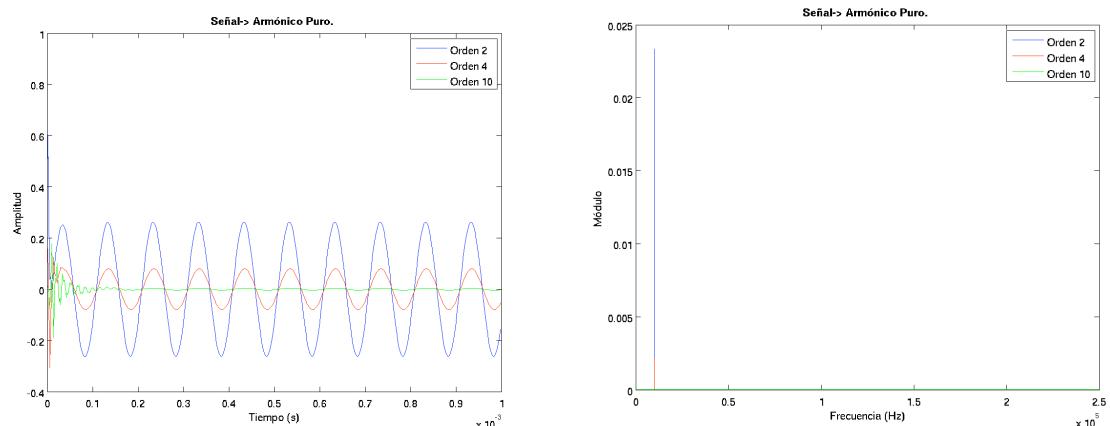


g. Señal modulada FM.

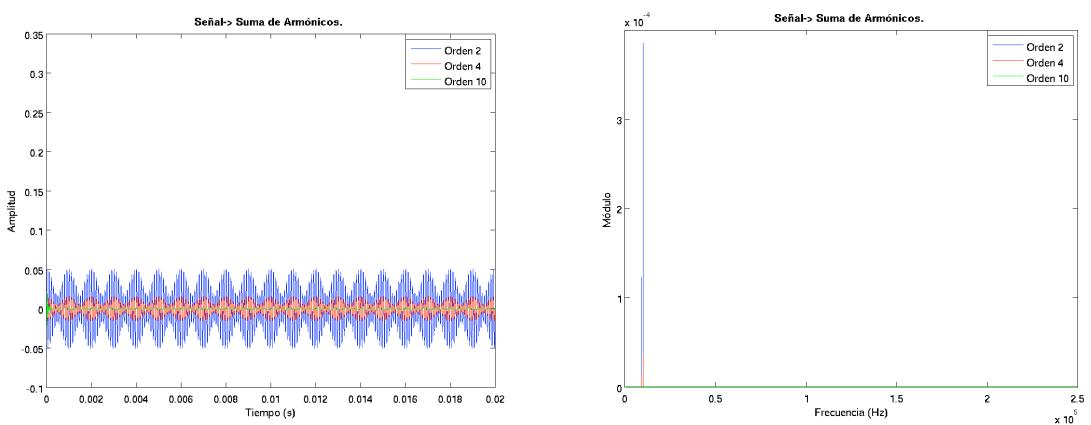


4.2.1.1. FILTRO TIPO ELÍPTICO

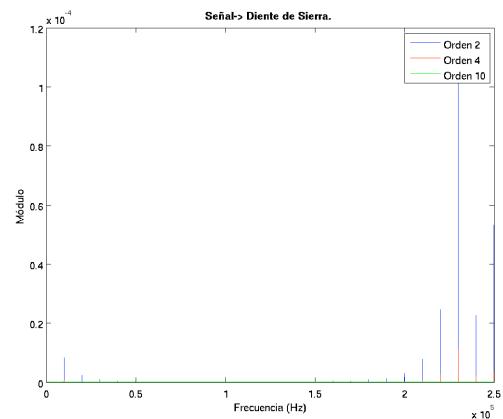
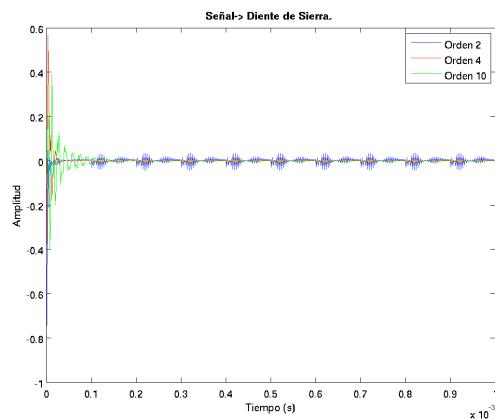
a. Armónico puro.



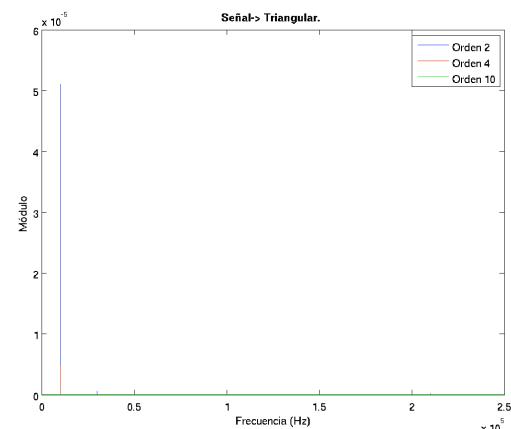
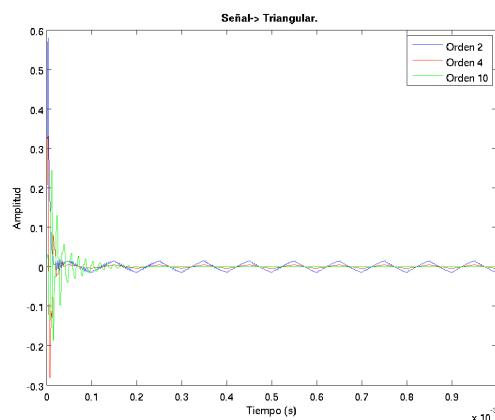
b. Suma de armónicos.



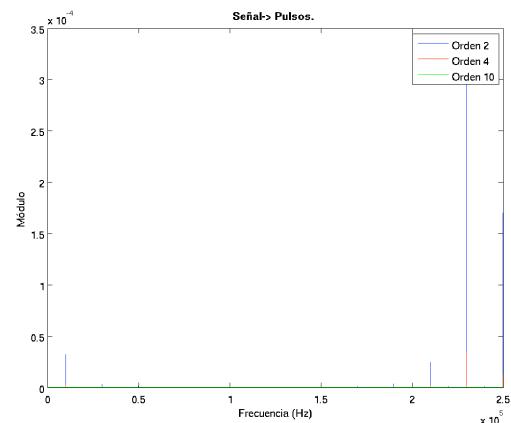
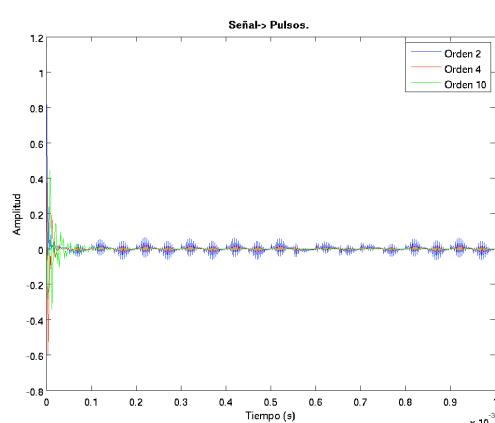
c. Diente de sierra.



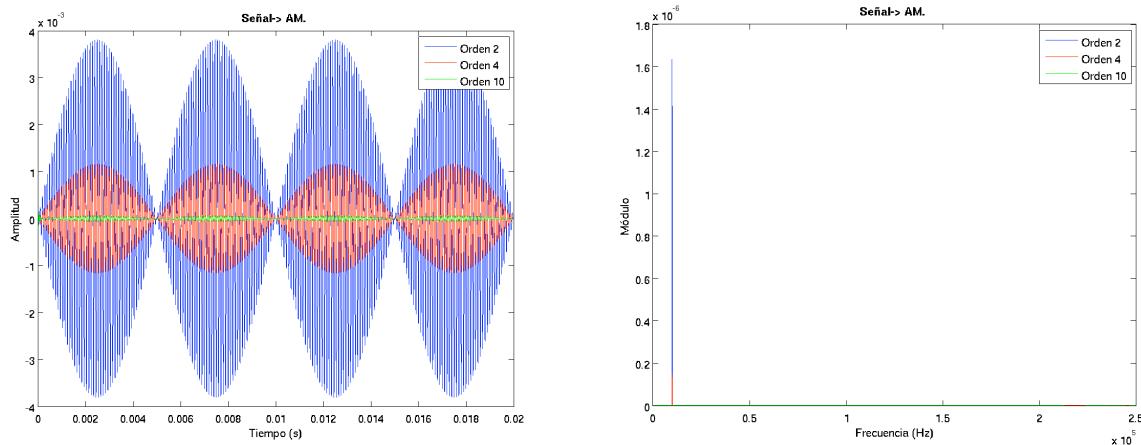
d. Triangular.



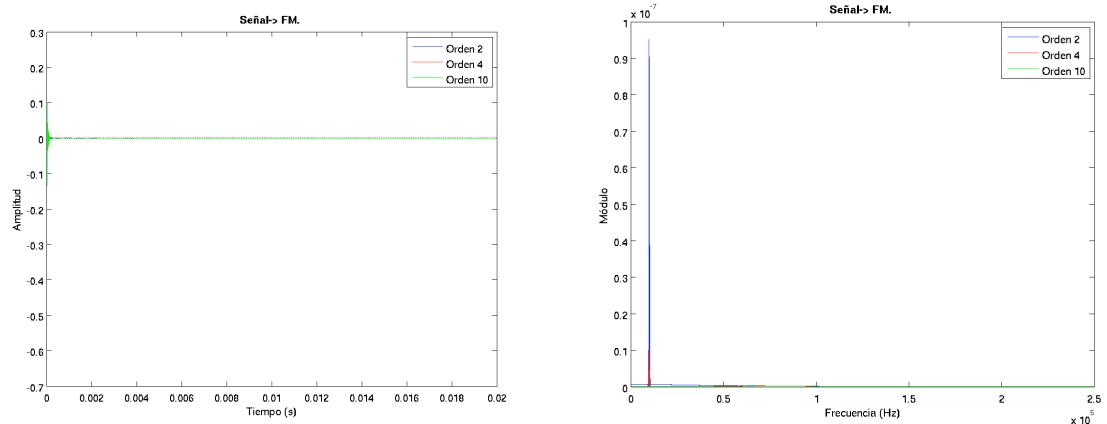
e. Pulso.



f. Señal modulada AM.



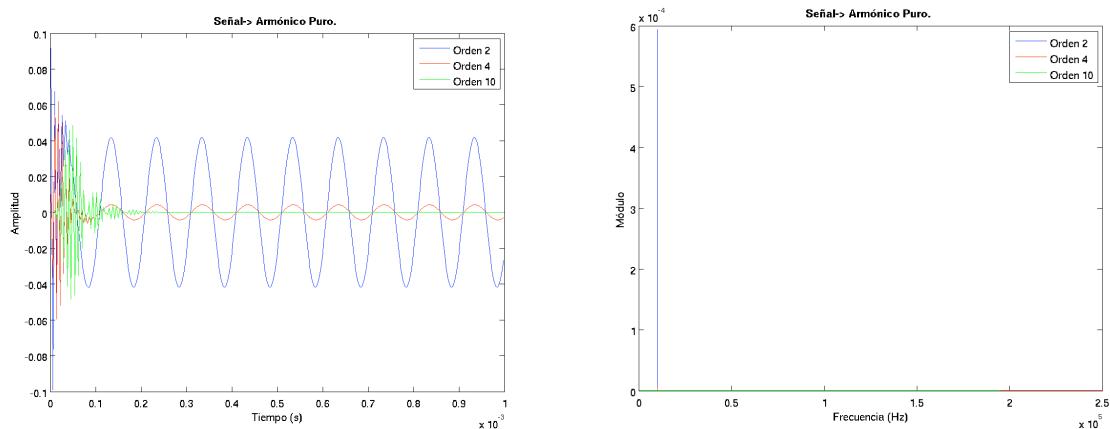
g. Señal modulada FM.



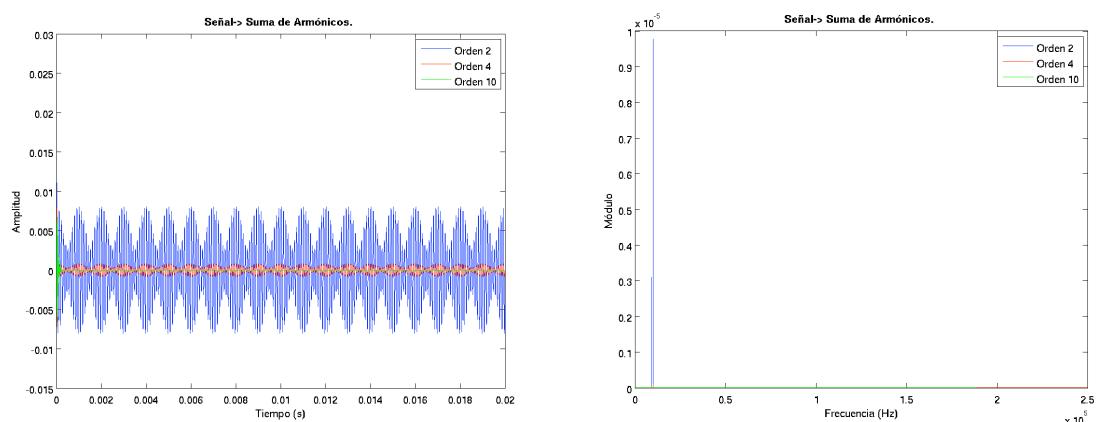
4.2.2. CANAL ESTRECHO (BP: 9 KHZ – 11 KHZ)

4.2.1.1. FILTRO TIPO BUTTERWORTH

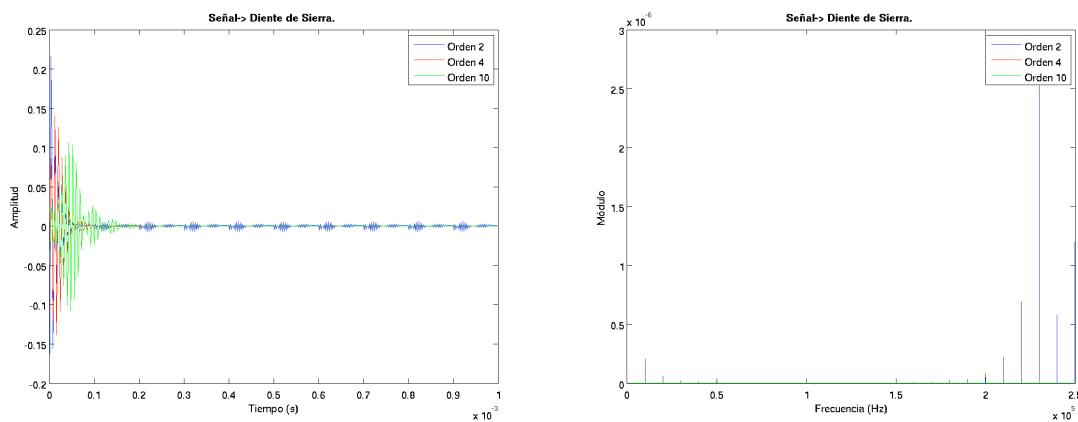
a. Armónico puro.



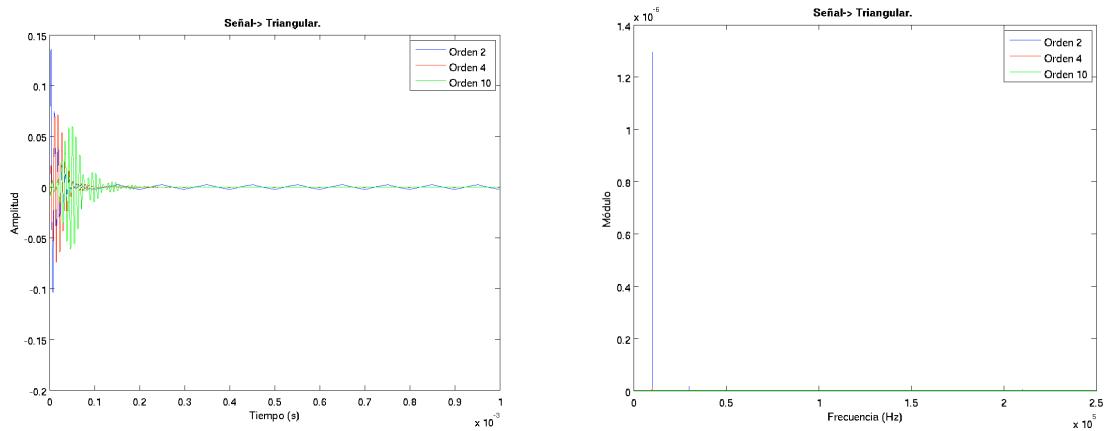
b. Suma de armónicos.



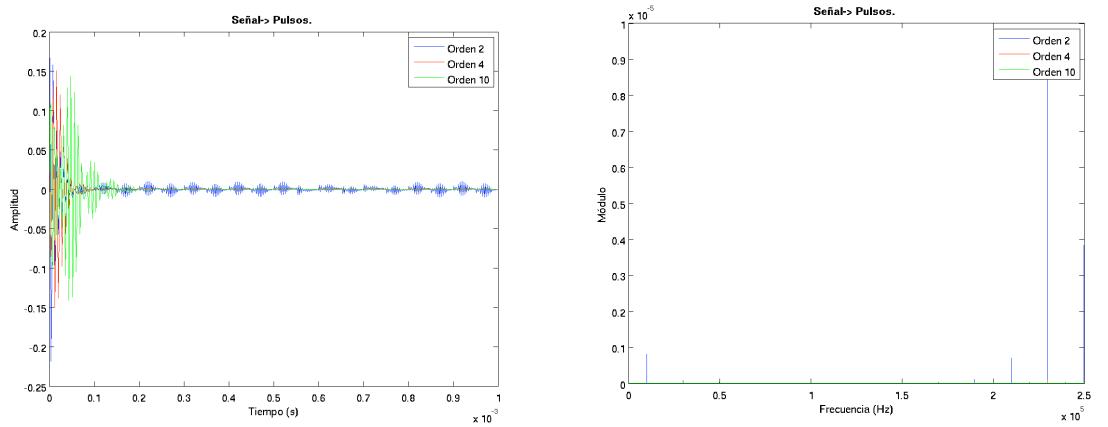
c. Diente de sierra.



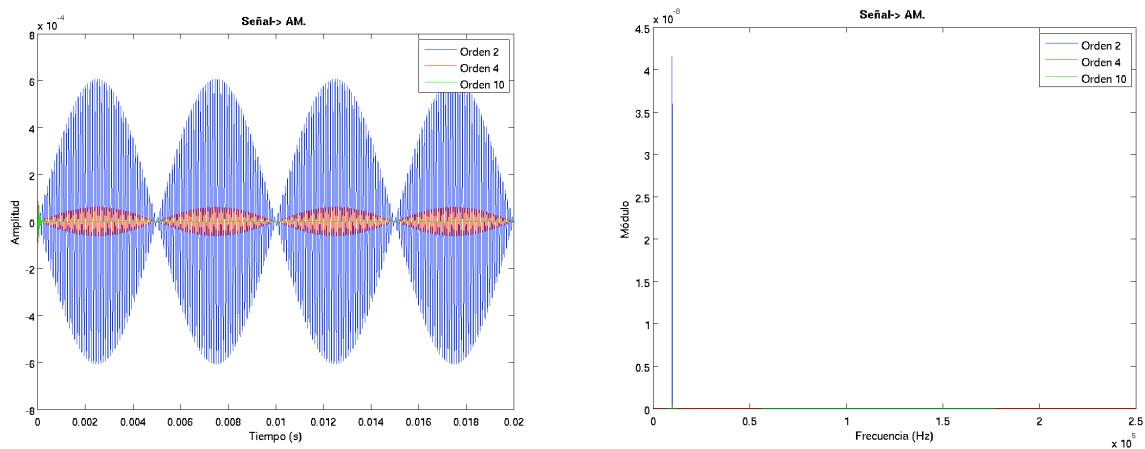
d. Triangular.



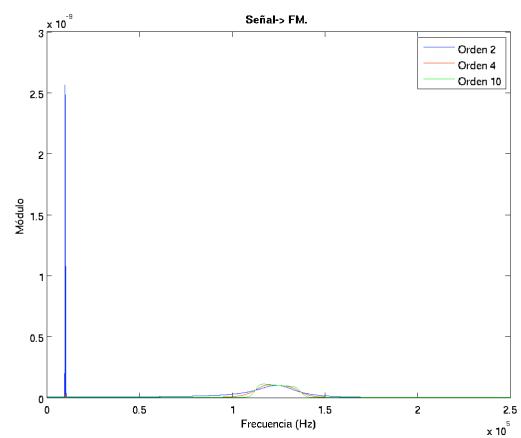
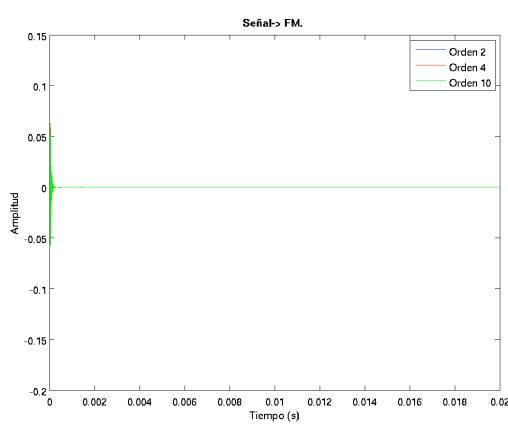
e. Pulso.



f. Señal modulada AM.

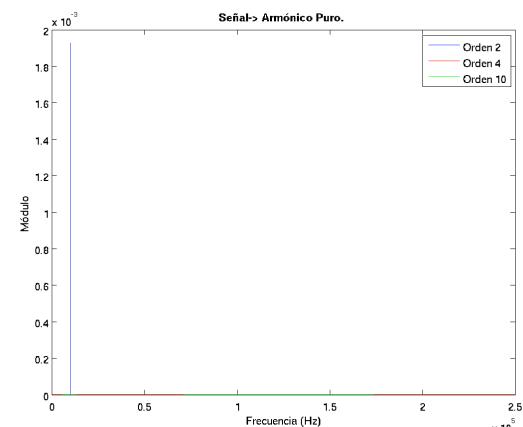
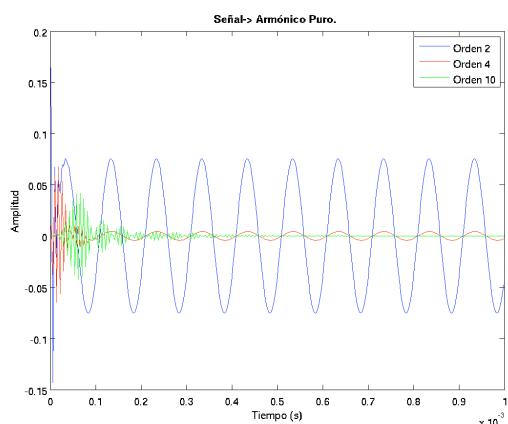


g. Señal modulada FM.

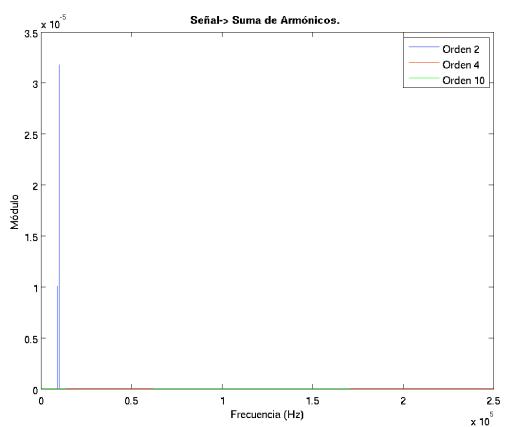
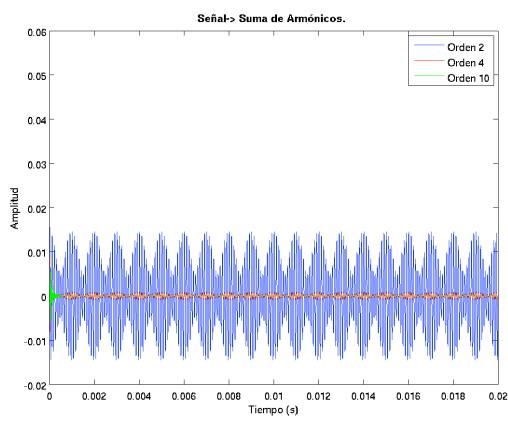


4.2.1.2. FILTRO TIPO CHEBYSHEV

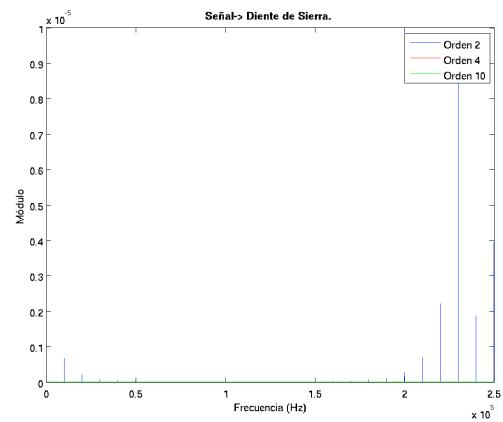
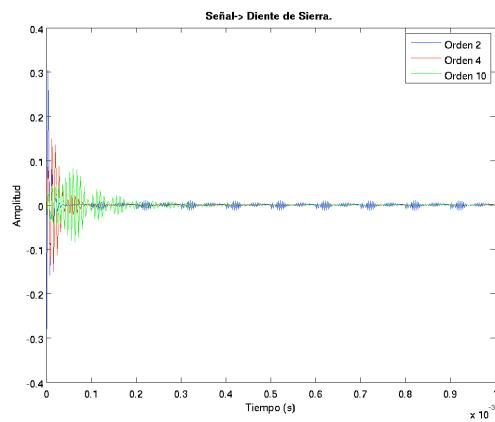
a. Armónico puro.



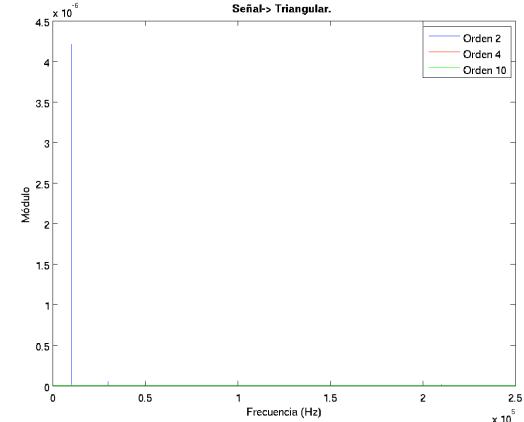
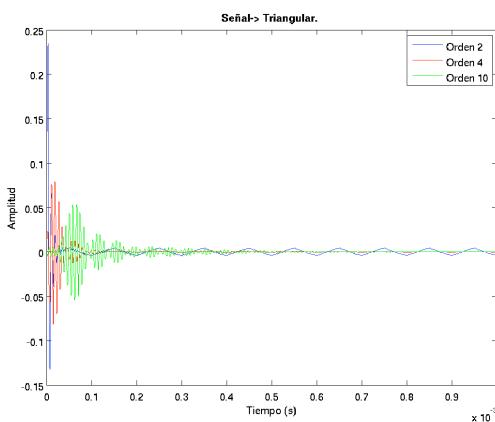
b. Suma de armónicos.



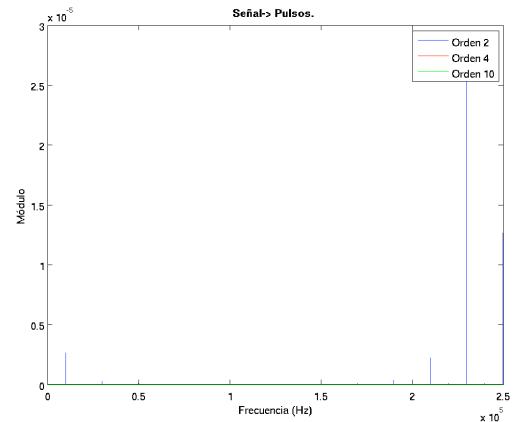
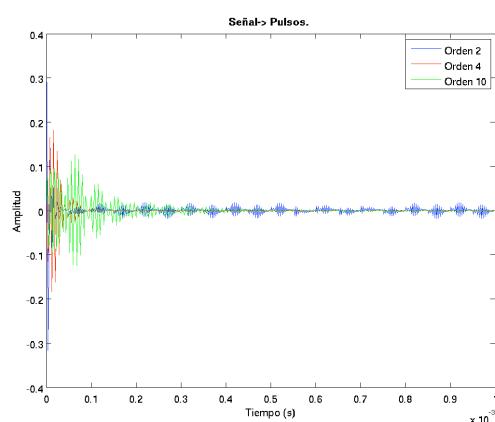
c. Diente de sierra.



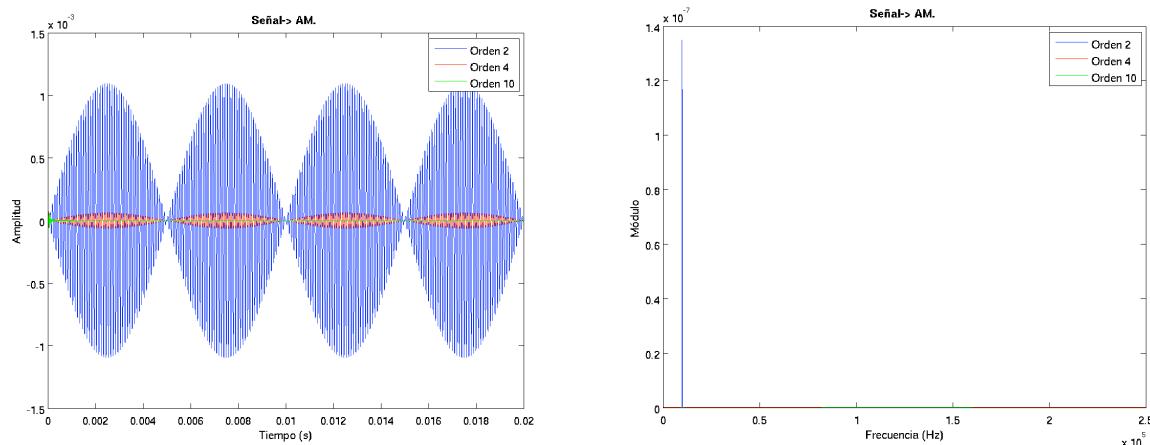
d. Triangular.



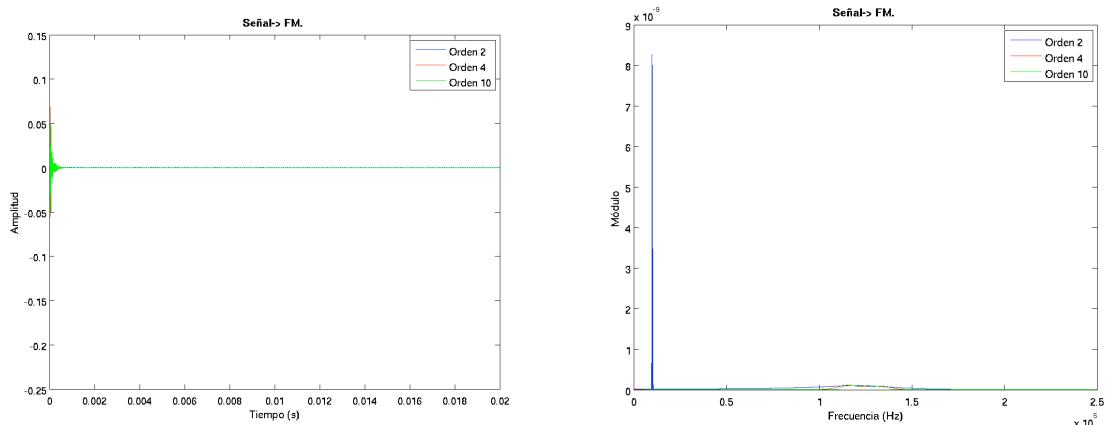
e. Pulso.



f. Señal modulada AM.

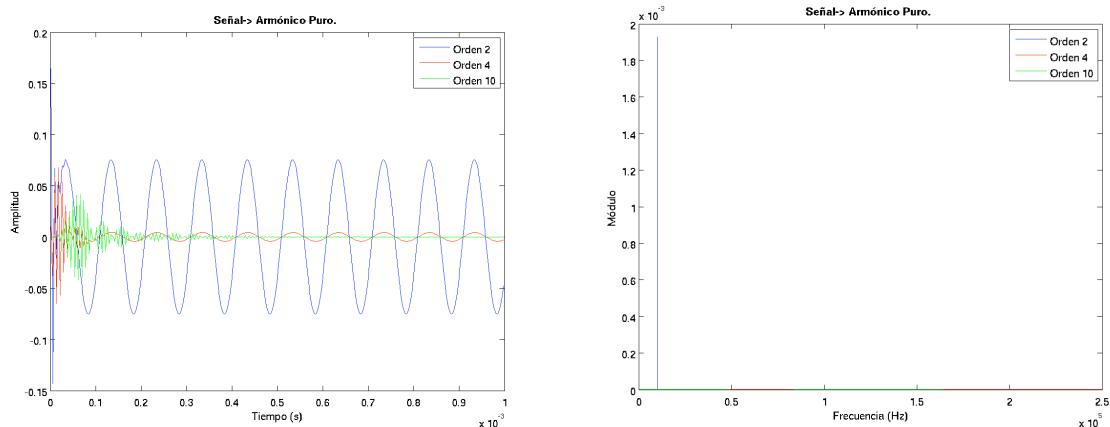


g. Señal modulada FM.

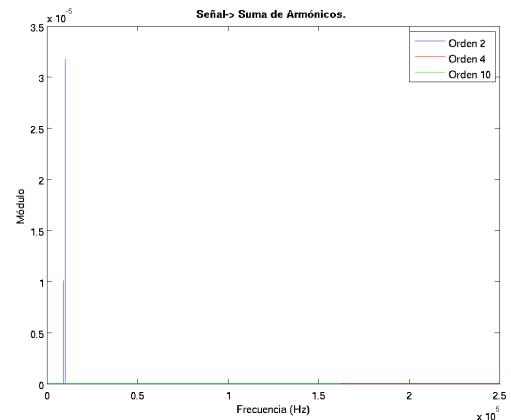
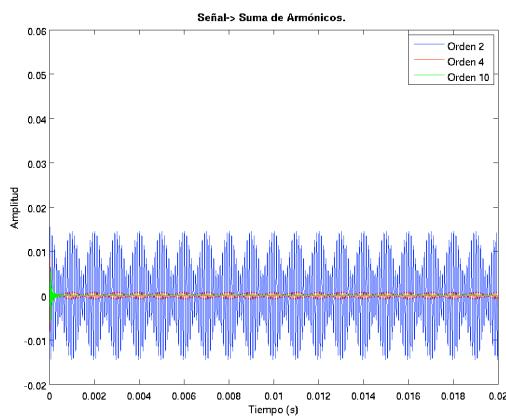


4.2.1.1. FILTRO TIPO ELÍPTICO

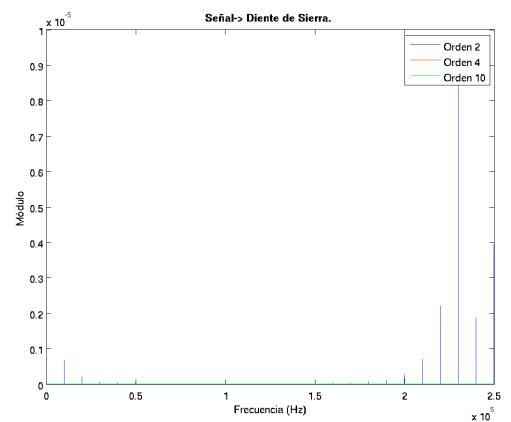
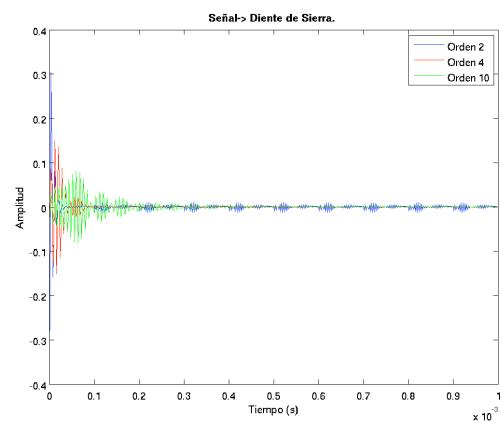
a. Armónico puro.



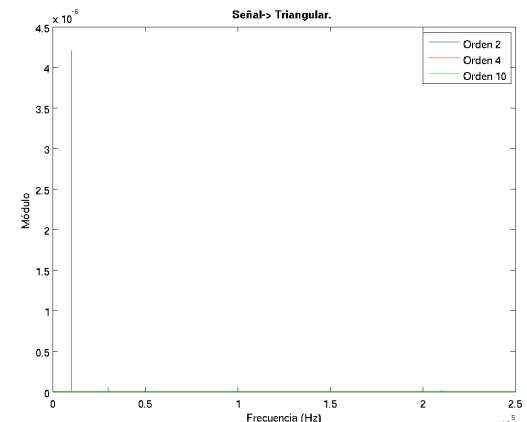
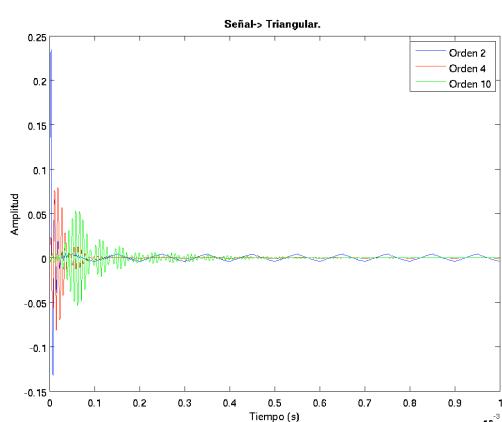
b. Suma de armónicos.



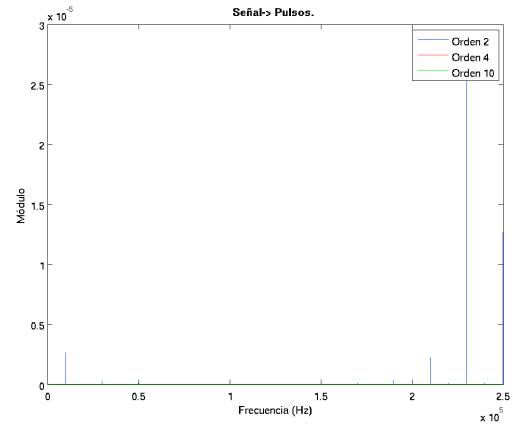
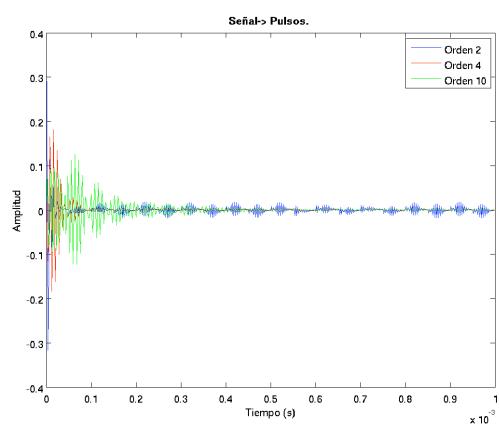
c. Diente de sierra.



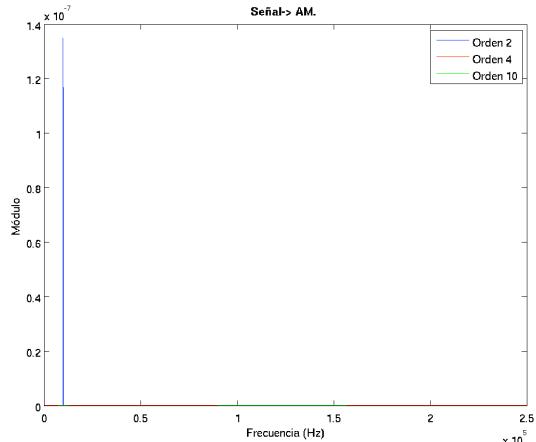
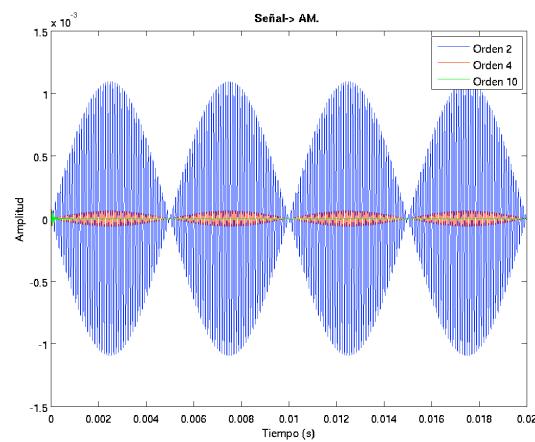
d. Triangular.



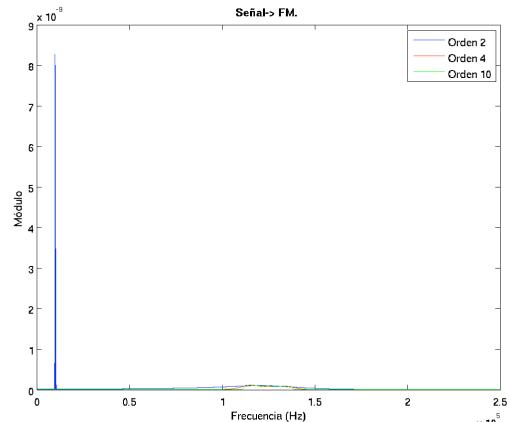
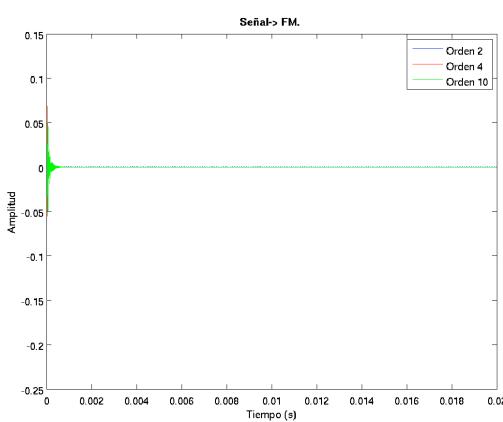
e. **Pulsos.**



f. **Señal modulada AM.**



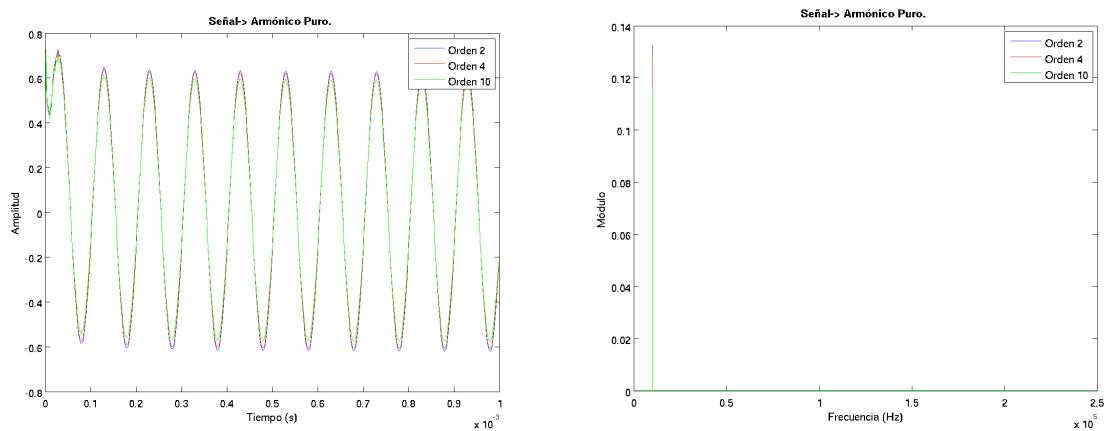
g. **Señal modulada FM.**



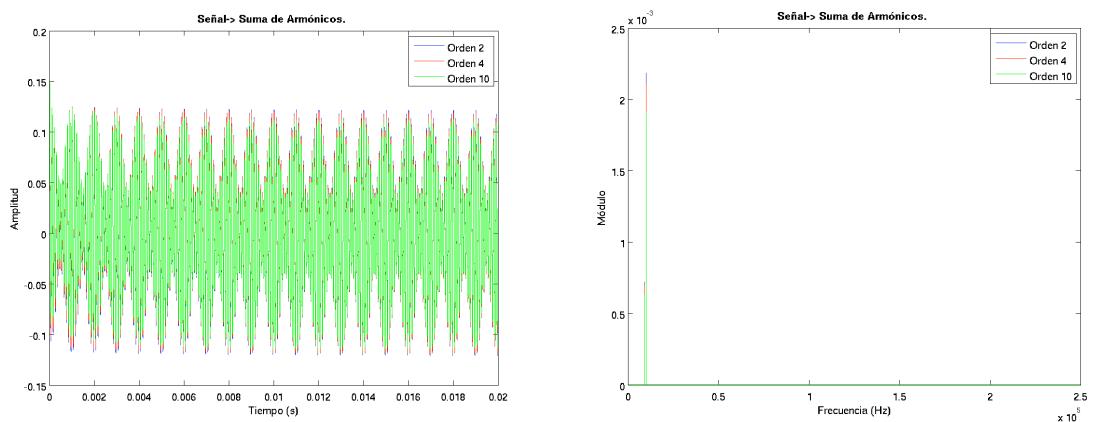
4.2.2. CANAL ANCHO (BP: 2 Hz – 20 KHZ)

4.2.1.1. FILTRO TIPO BUTTERWORTH

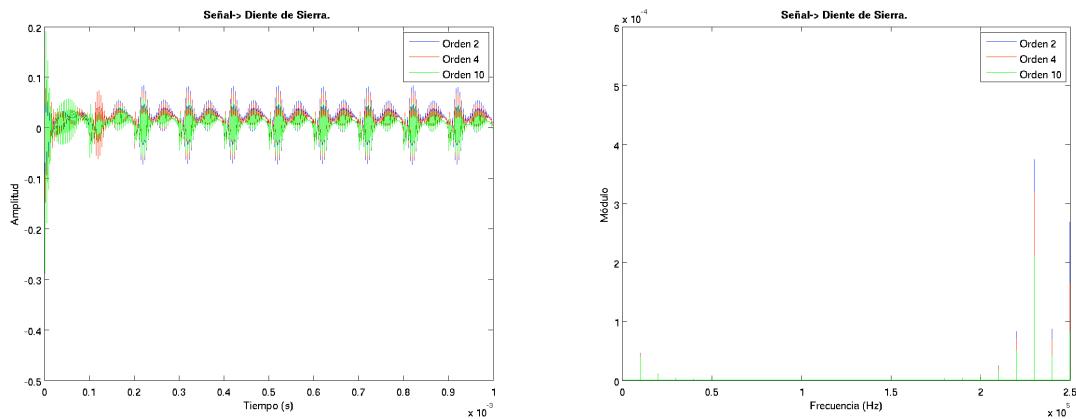
a. Armónico puro.



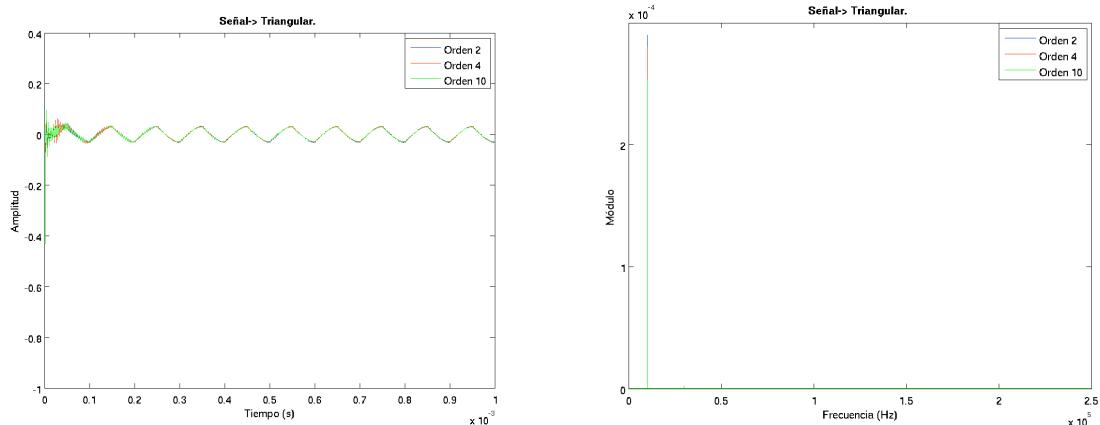
b. Suma de armónicos.



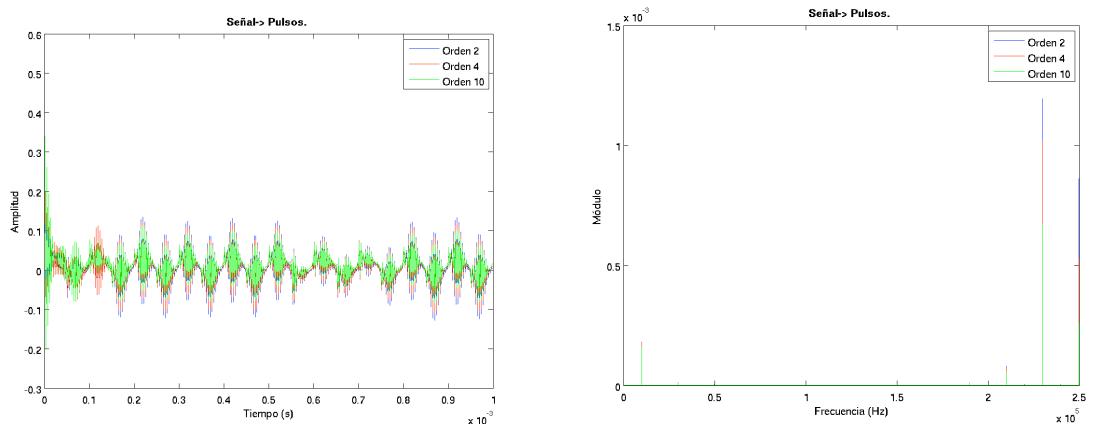
c. Diente de sierra.



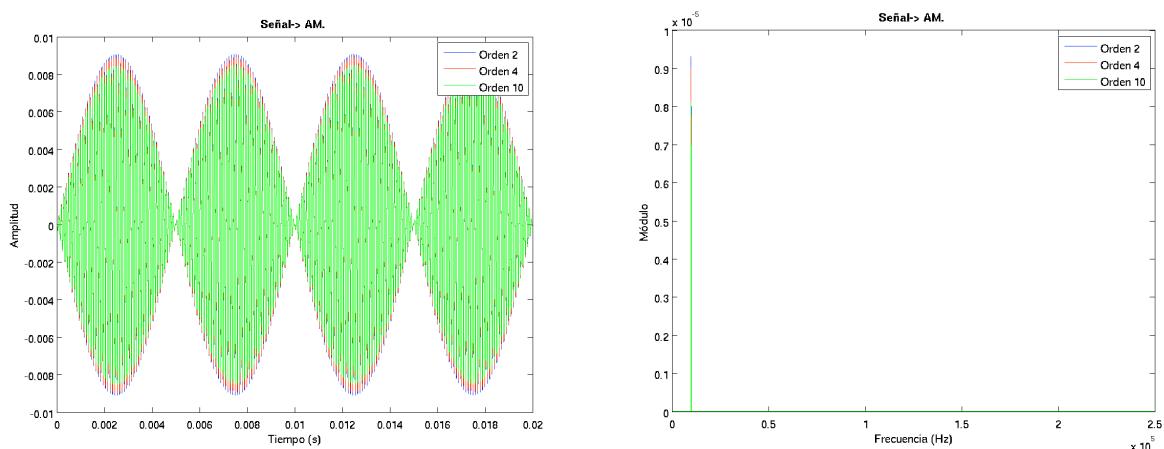
d. Triangular.



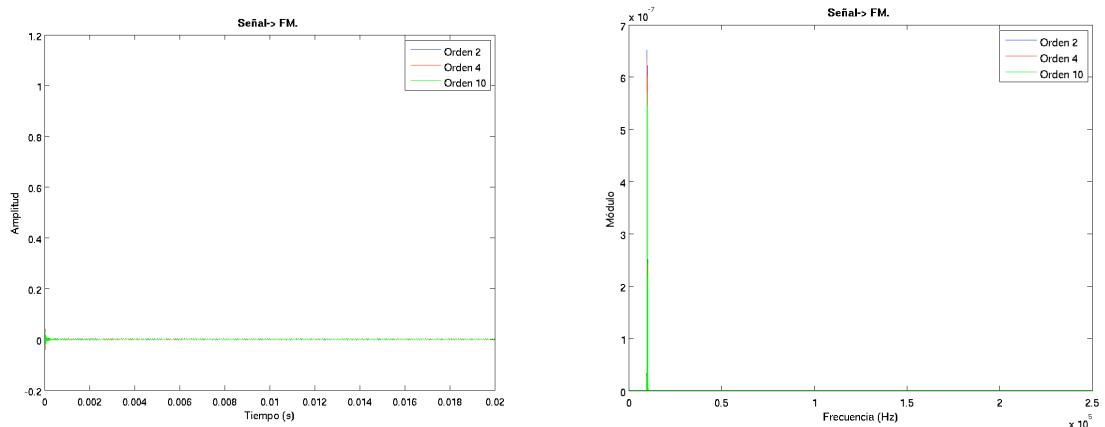
e. Pulses.



f. Señal modulada AM.

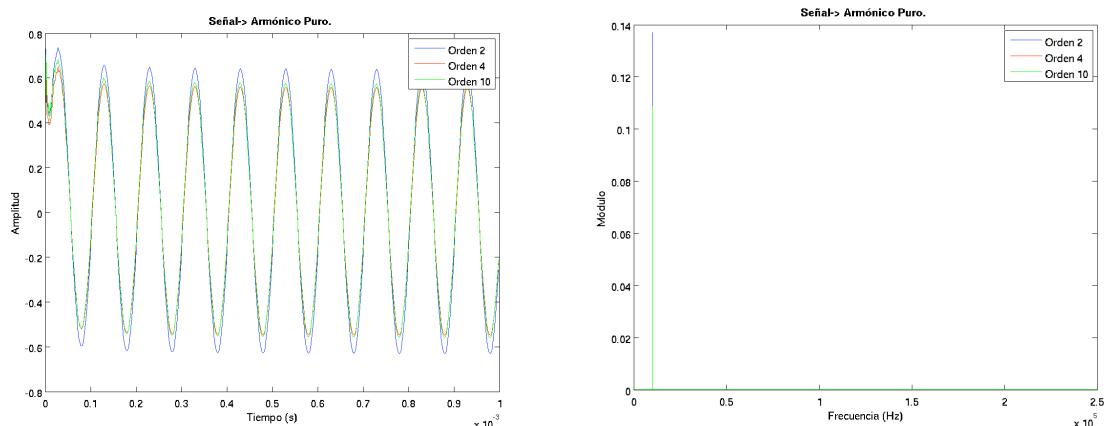


g. Señal modulada FM.

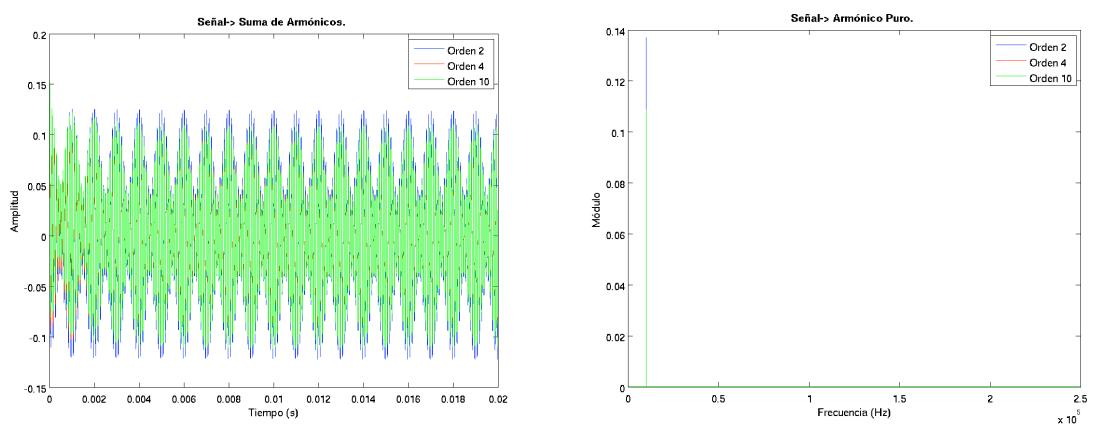


4.2.1.2. FILTRO TIPO CHEBYSHEV

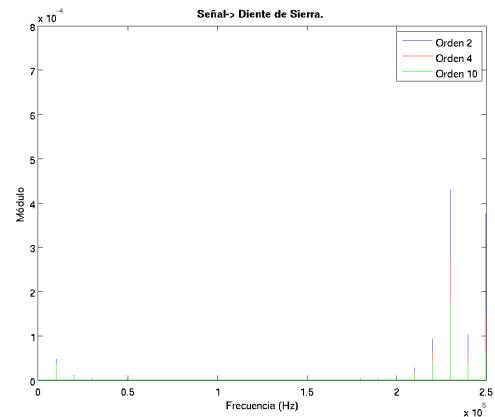
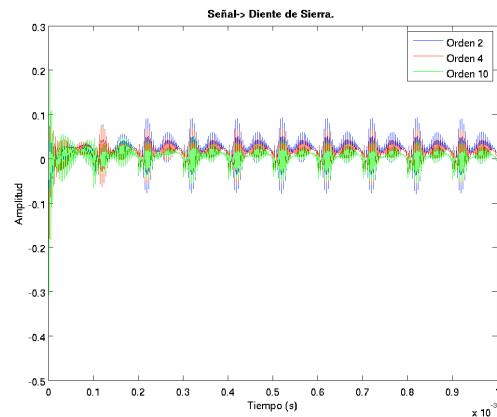
a. Armónico puro.



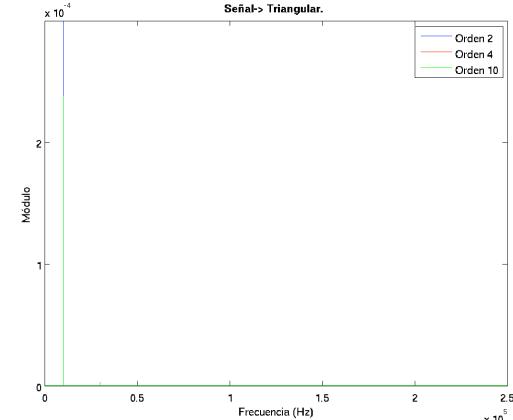
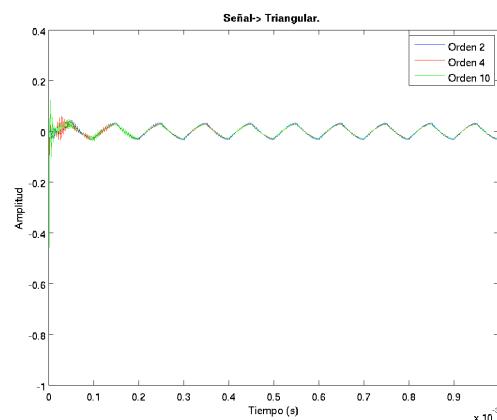
b. Suma de armónicos.



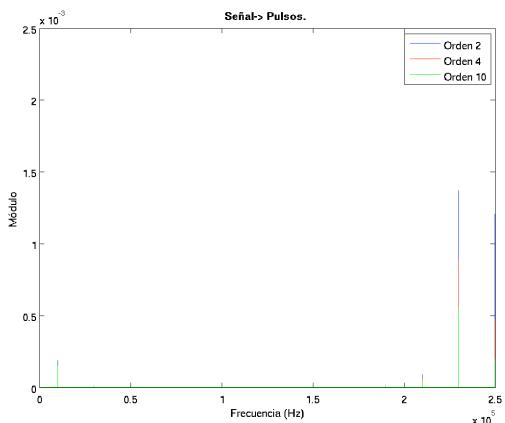
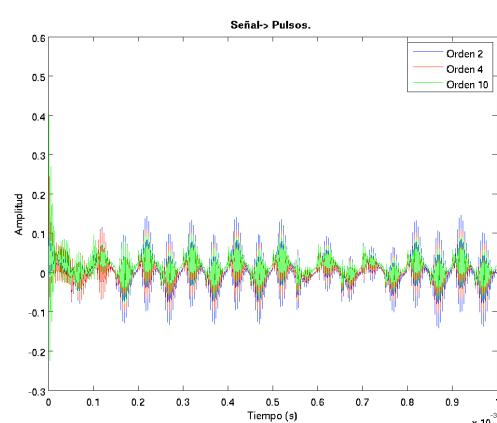
c. Diente de sierra.



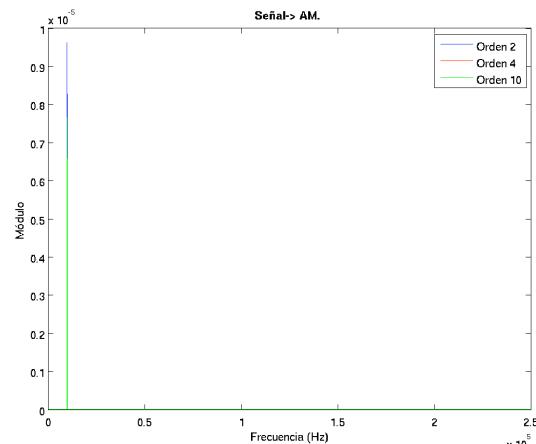
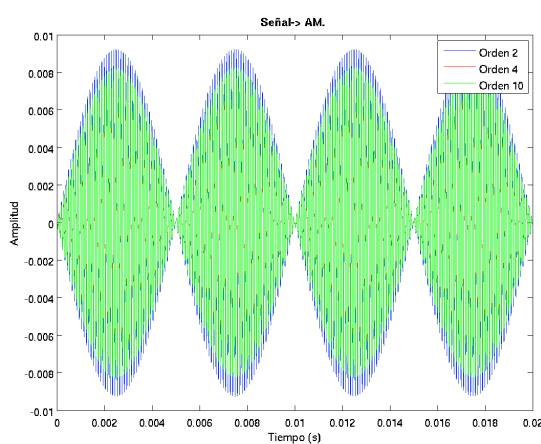
d. Triangular.



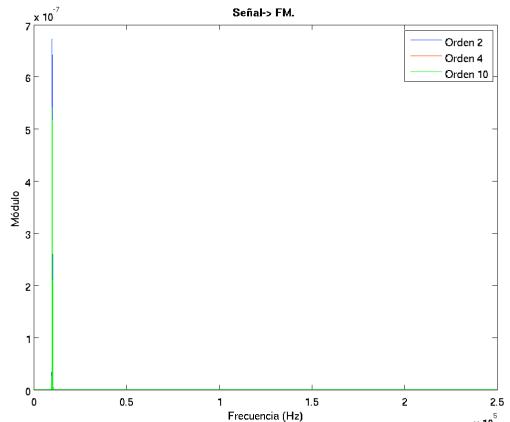
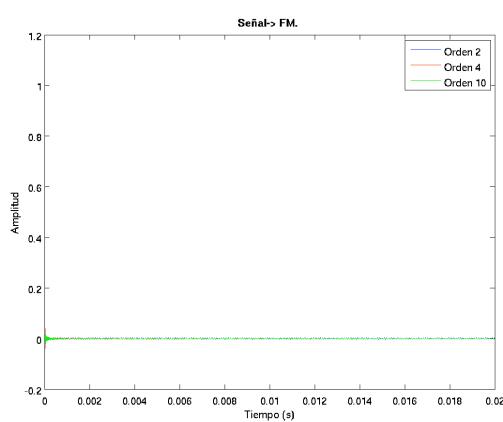
e. Pulso.



f. Señal modulada AM.

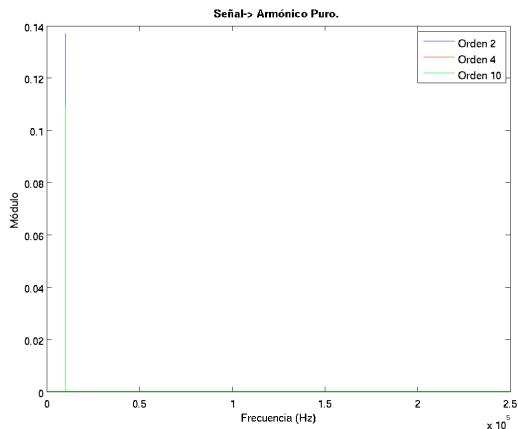
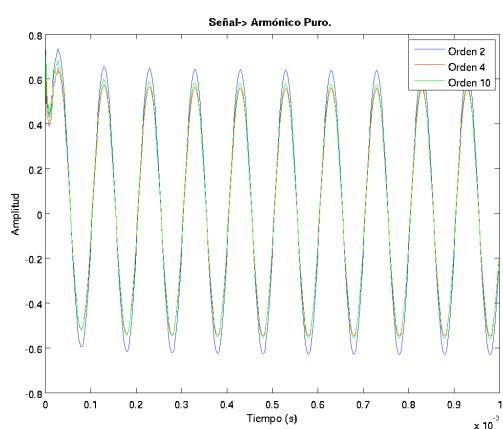


g. Señal modulada FM.

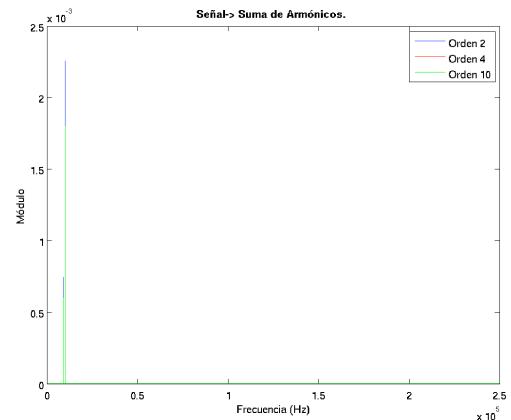
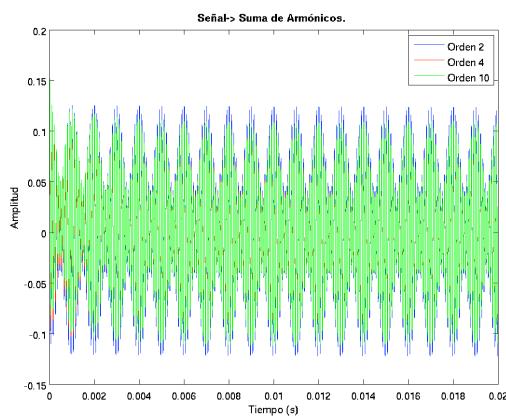


4.2.1.1. FILTRO TIPO ELÍPTICO

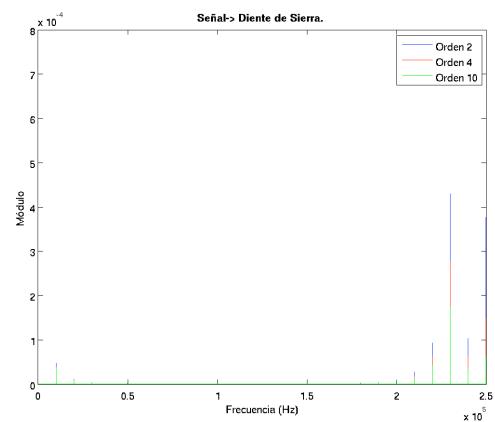
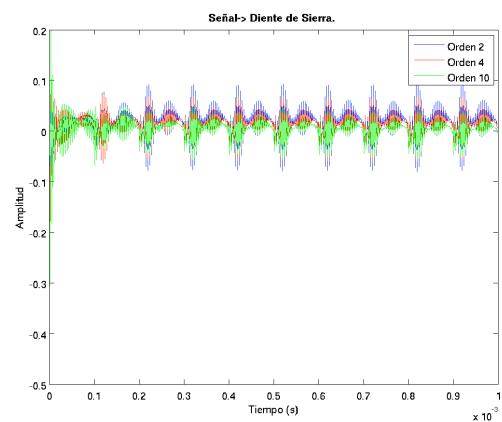
a. Armónico puro.



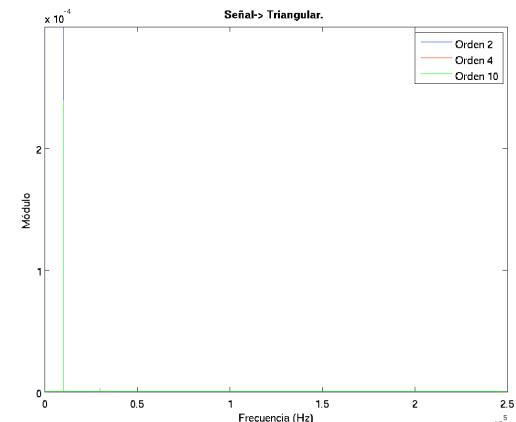
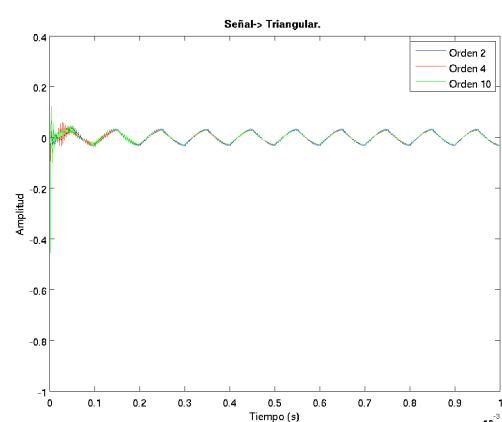
b. Suma de armónicos.

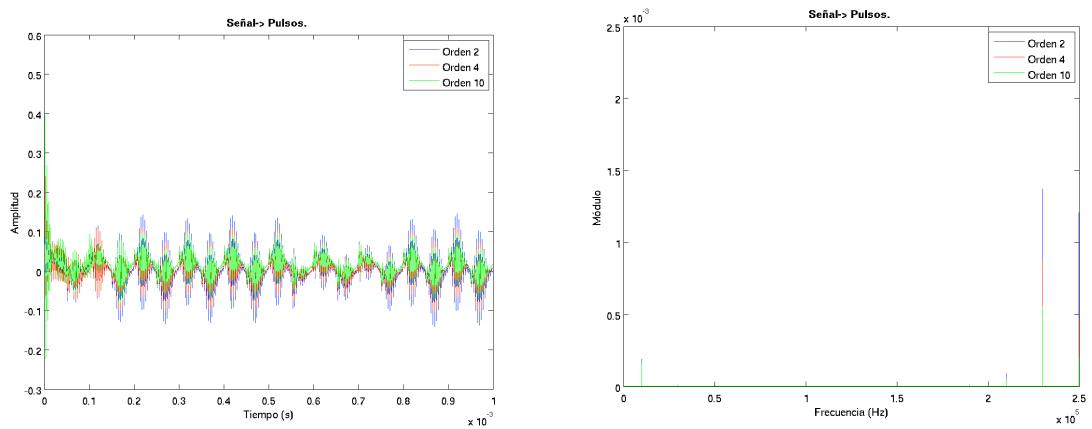
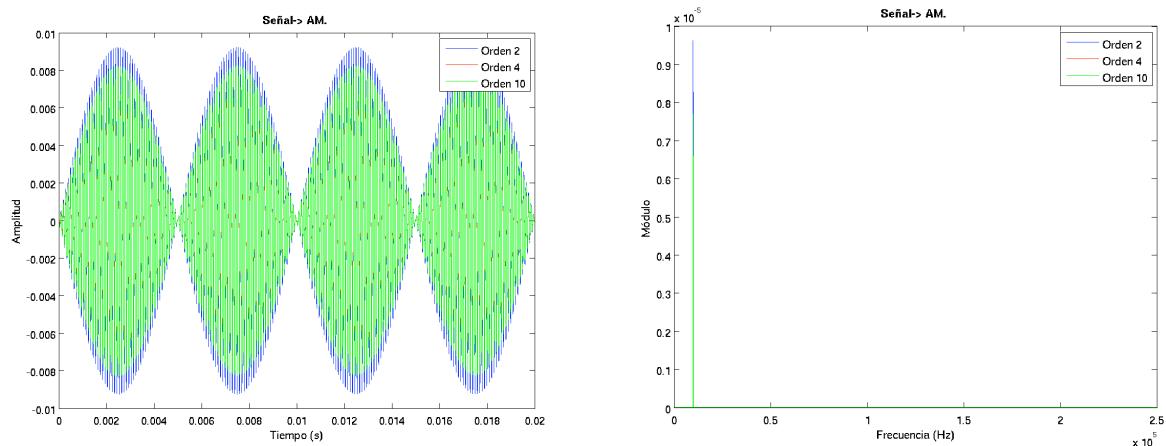
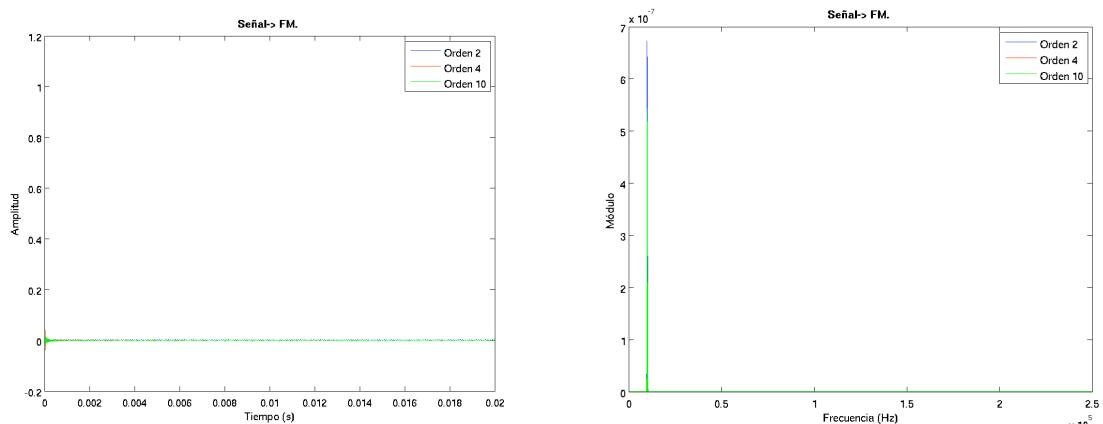


c. Diente de sierra.



d. Triangular.



e. Pulsos.**f. Señal modulada AM.****g. Señal modulada FM.**

5. CONCLUSIONES.-

Tal y como era de esperar, la transmisión de las señales se ve afectada por el canal, en este caso modelado mediante filtros. Es por ello que cuanto mayor sea el ancho de banda del canal, menor efecto tiene el mismo sobre la señal transmitida. De igual manera, cuanto mayor es el orden del filtro, mayor es la atenuación que se produce en las señales transmitidas ya que el corte del filtro es más abrupto. Otro de los efectos que introduce el orden del filtro utilizado es que, conforme mayor es el orden, mayor es la distorsión que se produce en la señal antes de que ésta alcance su forma de onda original. En cuanto a lo que respecta al tipo de filtro, hay que decir que no se encuentran grandes diferencias, en cuanto a recuperación de la señal se refiere, entre el comportamiento del sistema según el canal sea de tipo Butterworth, Chebyshev o elíptico.

De esta forma, casi todas las señales pueden recuperarse en todos los casos a pesar de su escasa amplitud a excepción de las señales diente de sierra y pulsos rectangulares. Para estas dos últimas señales mencionadas, la forma de onda obtenida a la salida es totalmente diferente a la de la entrada, aunque parte de su espectro es similar al original. Como puede verse en algunas de las representaciones de espectro mostradas anteriormente (no se muestra este efecto en todos los casos, aunque ocurre siempre, para poder centrarnos en la parte de espectro original) aparecen nuevos armónicos a frecuencias altas con una energía mucho mayor que los armónicos de la señal original. Es probable que si se realiza un filtrado paso bajo o banda, dicho efecto pudiera eliminarse en gran medida y la recuperación de la señal fuera mejor.

Por otro lado, hay que hacer mención a que el estudio realizado no tiene una precisión correcta debido a que está basado en afirmaciones teóricas. De esta forma, puesto que los filtros utilizados no son ideales, requisito indispensable para obtener las representaciones equivalentes en banda base, las señales se ven distorsionadas desde el primer momento. Además, aunque todos los filtros utilizados han sido diseñados para proporcionar ganancia unidad en la banda de paso, realmente introducen cierta atenuación en dicha banda.

Asimismo, es importante resaltar también que algunas de las señales estudiadas no son paso banda, pues su espectro es infinito y, por tanto, su ancho de banda es mucho mayor que la frecuencia central de la señal. Éste es el caso de las señales diente de sierra, triangular y de pulsos rectangulares. De esta forma, la conversión que se realiza a estas señales no es correcta, pues se limita su espectro, deformándose su forma de onda y consiguiendo resultados con un bajo nivel de corrección.

Por último hay que decir que el tratamiento realizado de las señales es digital y no analógico como debería de ser. Esto se debe a que Matlab únicamente puede trabajar con señales digitales, pues trabaja con muestras de la señal. A pesar de ello, puesto que la frecuencia de muestreo utilizada es 50 veces superior a la frecuencia de las señales, se obtiene un representación bastante cercana a la analógica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Haykin, S. *Communication systems*.
- [2] Matlab, *Signal Processing Toolbox: User's guide*.
- [3] Matlab, *Ayuda general de Matlab*.

APÉNDICE A: REPRESENTACIÓN DE LAS SEÑALES DE SALIDA.-

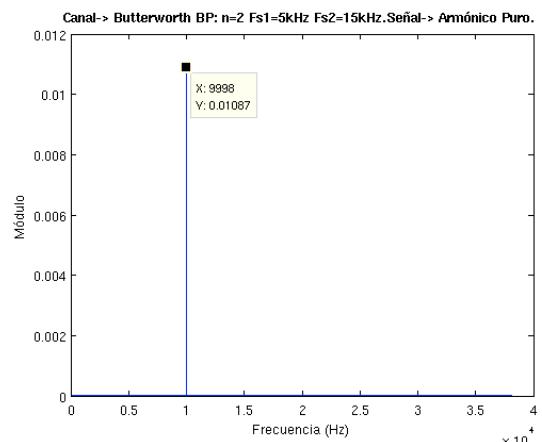
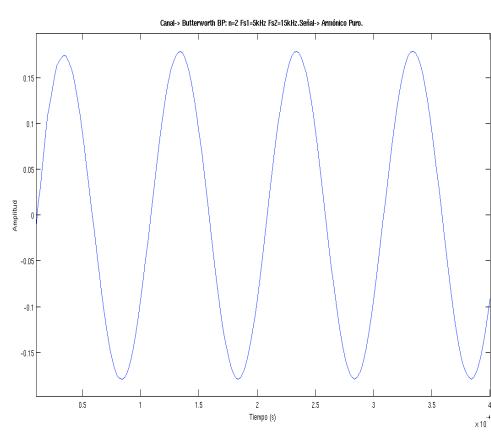
En este último apéndice se van a exponer las representaciones de todas las señales obtenidas como resultado de la simulación. En este caso, las imágenes se pueden ver con mayor claridad que en el apartado 4, puesto que no están agrupadas por órdenes de filtro.

A.1. CANAL INTERMEDIO (BP: 5 KHZ – 15 KHZ)

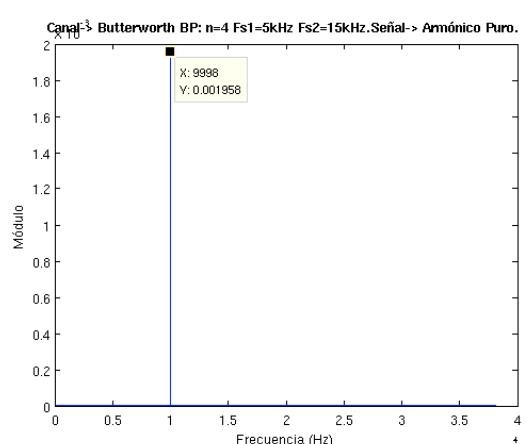
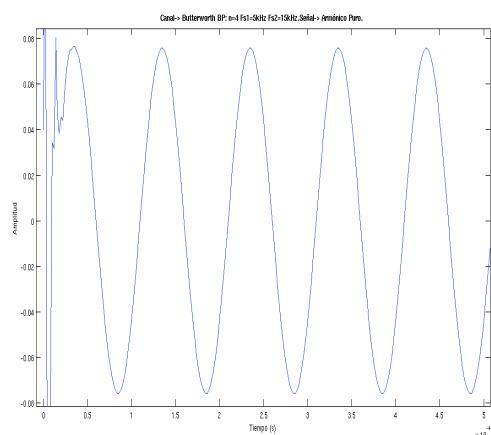
A.1.1. FILTRO TIPO BUTTERWORTH

a. Armónico puro.

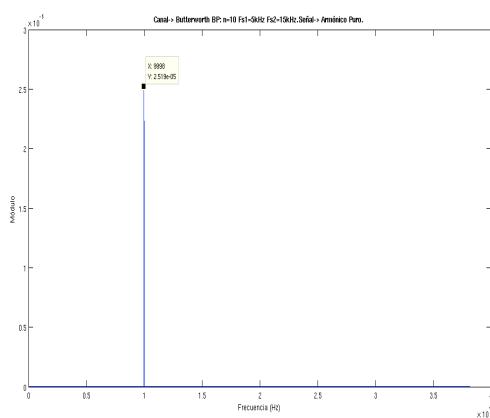
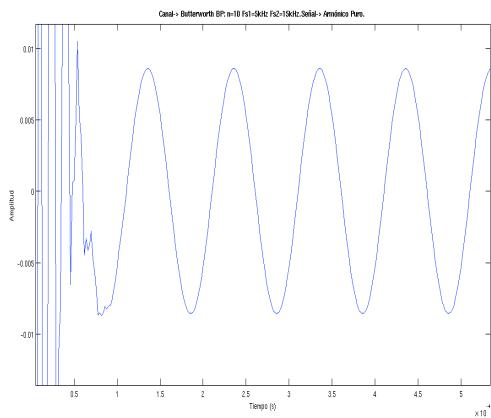
- Orden 2



- Orden 4

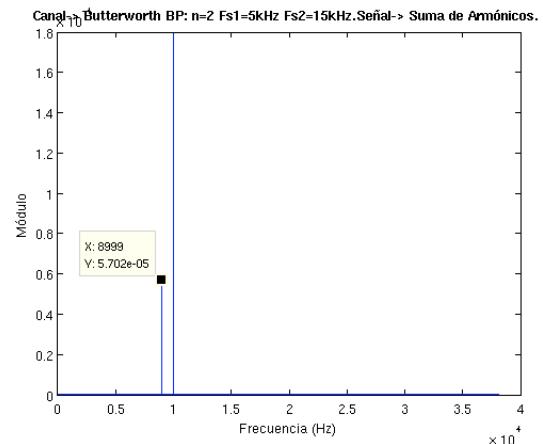
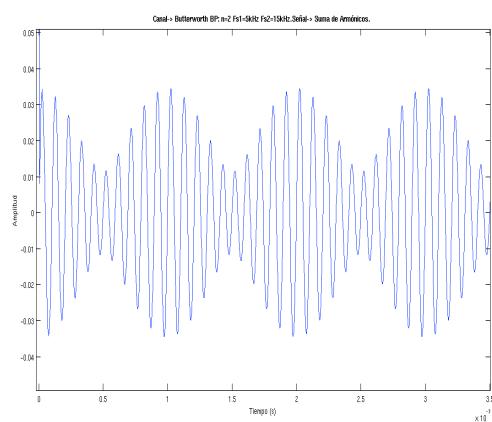


- Orden 10

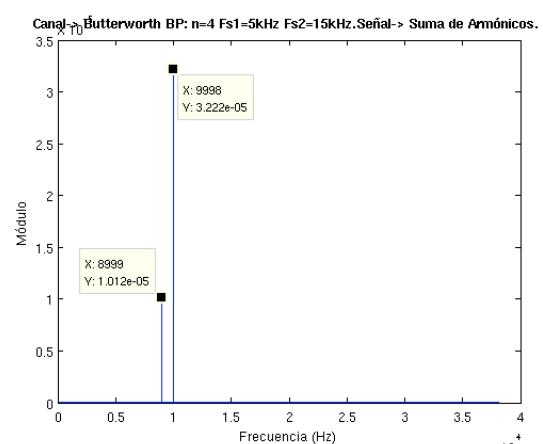
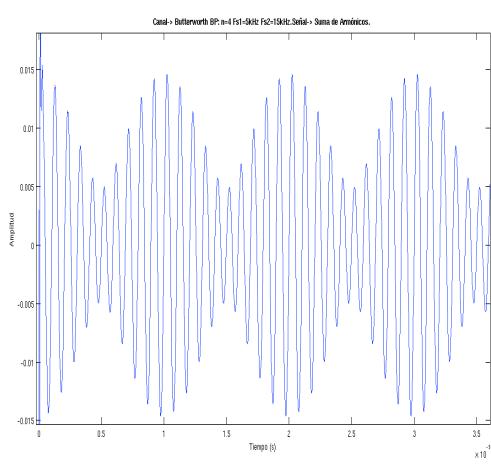


b. Suma de armónicos.

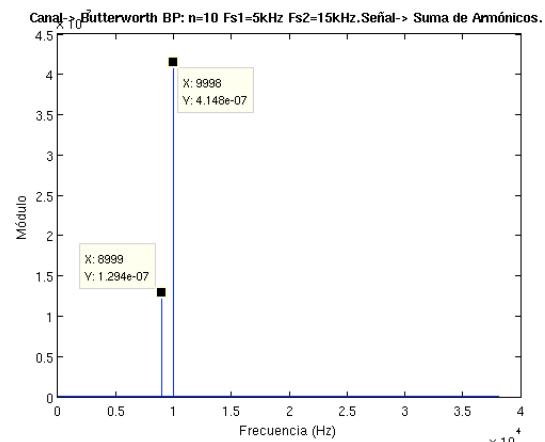
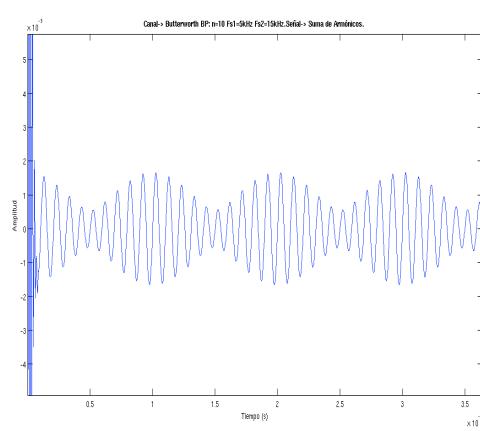
- Orden 2



- Orden 4

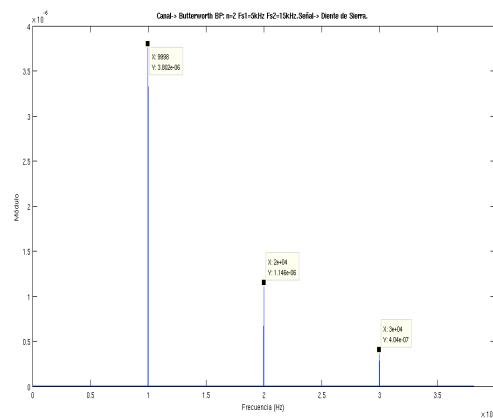
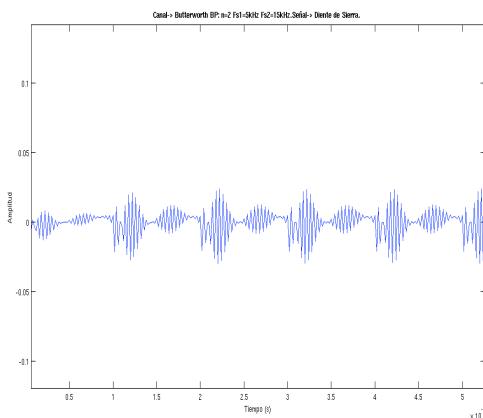


- *Orden 10*

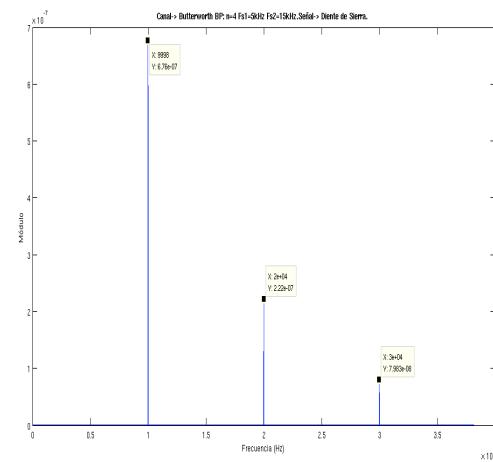
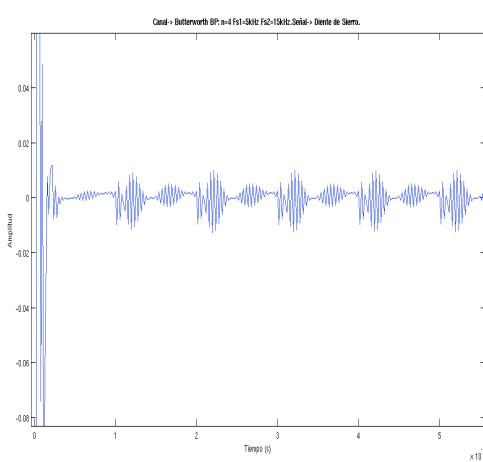


c. **Diente de sierra.**

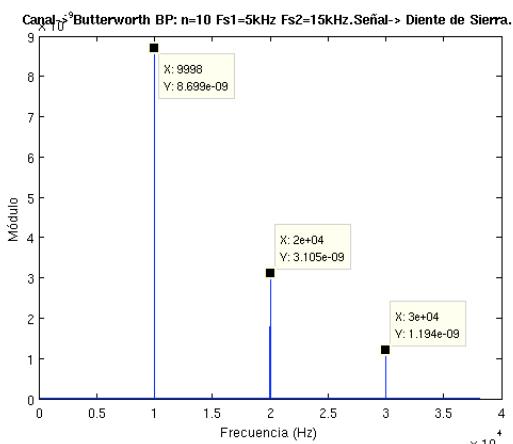
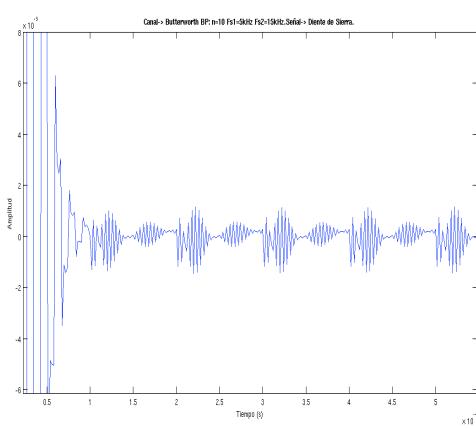
- *Orden 2*



- *Orden 4*

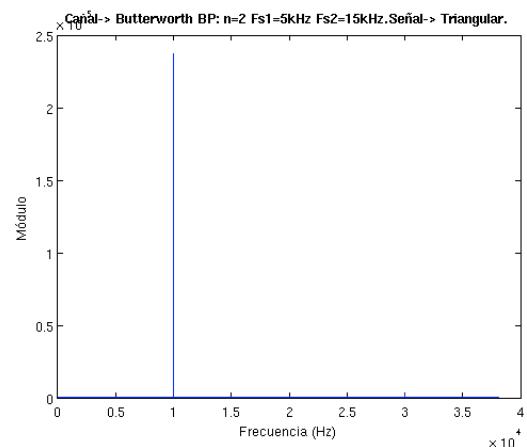
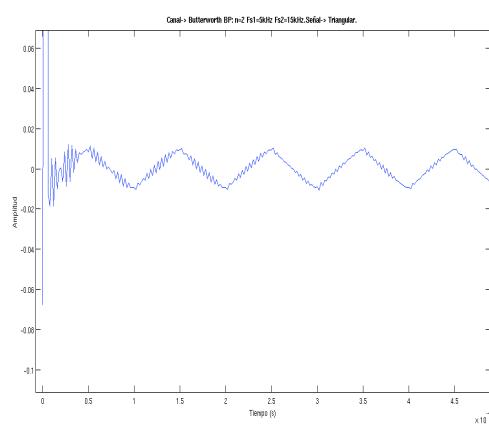


○ Orden 10

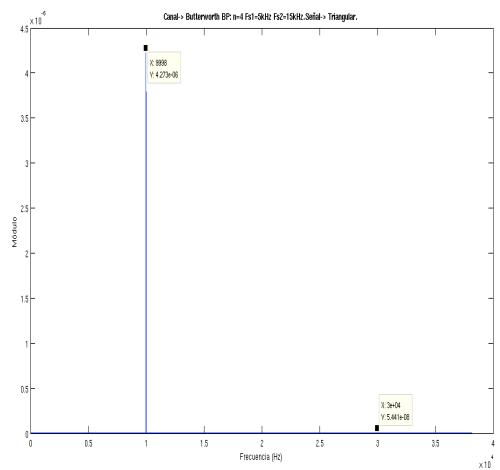
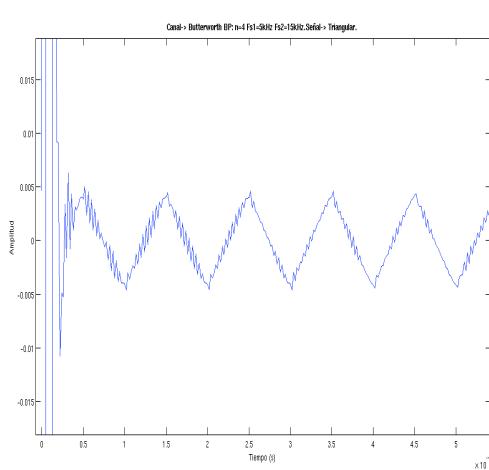


d. Triangular.

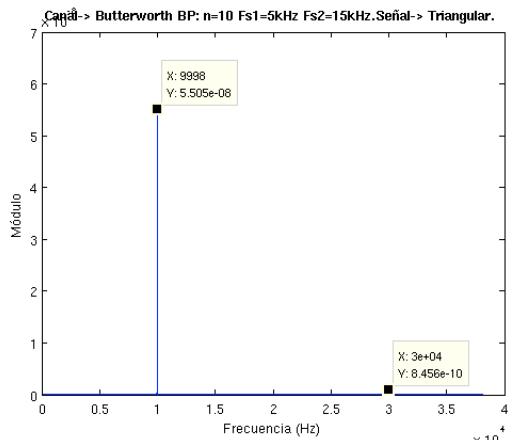
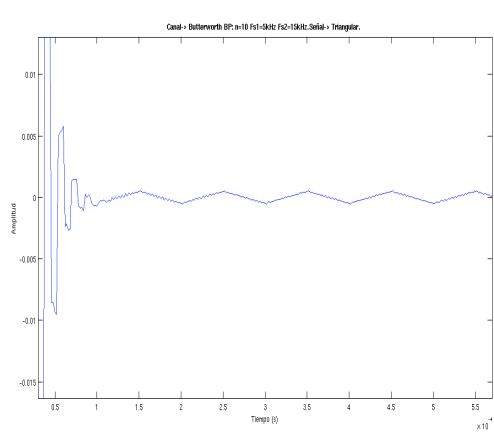
○ Orden 2



○ Orden 4

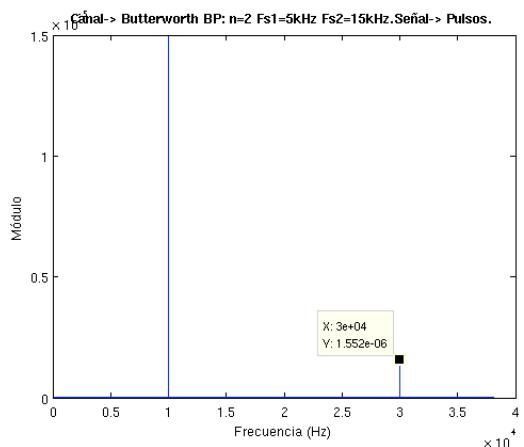
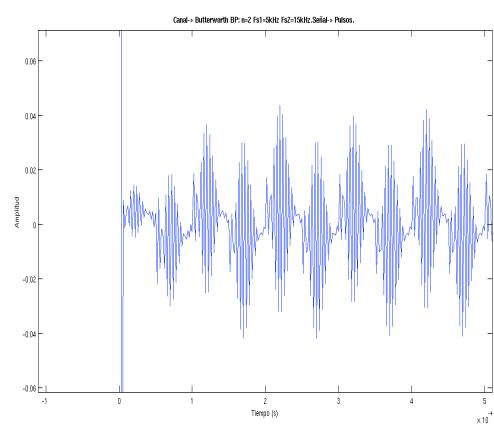


- Orden 10

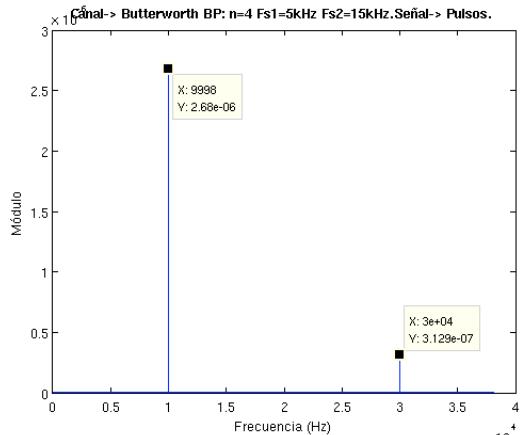
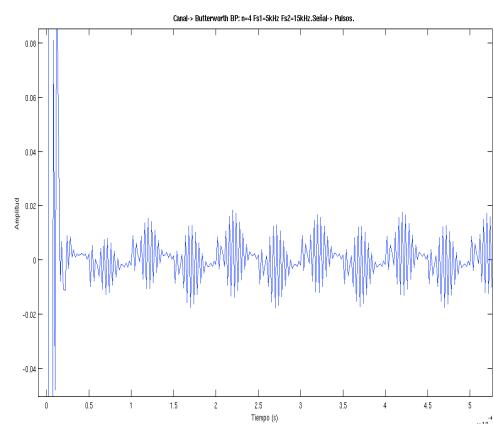


e. Pulsos.

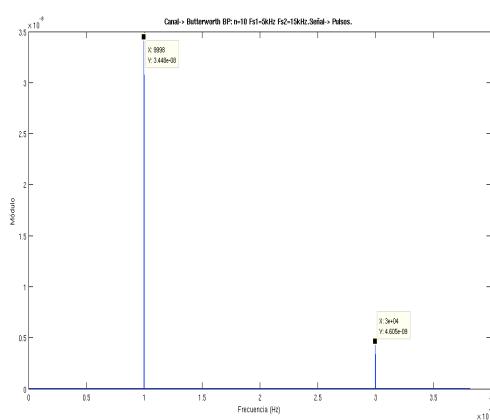
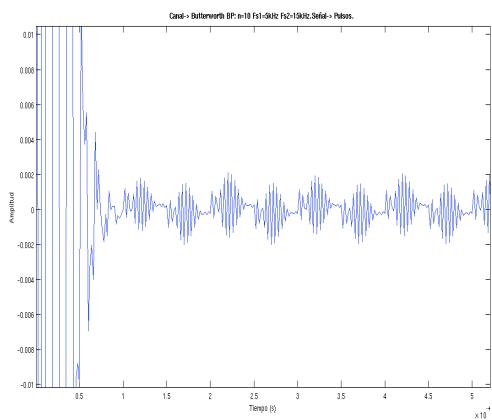
- Orden 2



- Orden 4

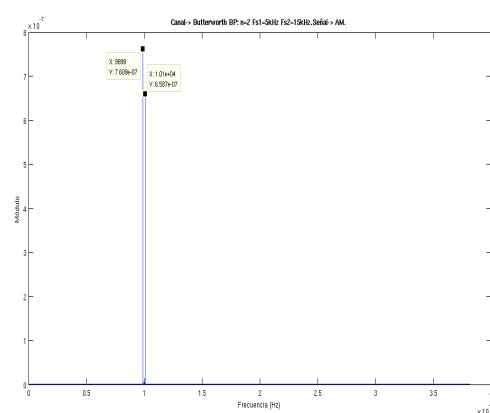
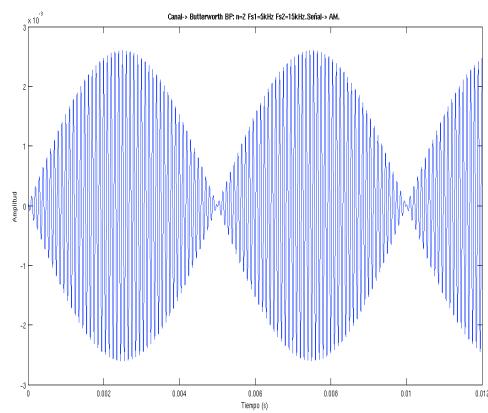


○ Orden 10

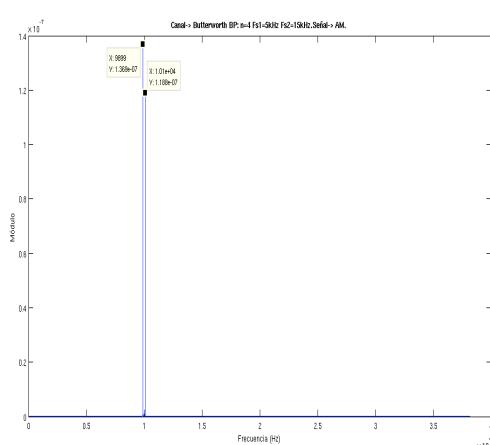
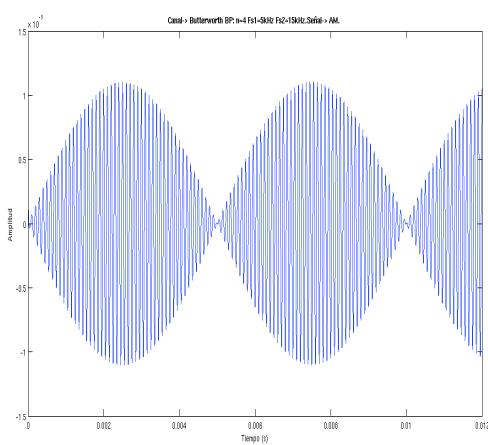


f. Señal modulada AM.

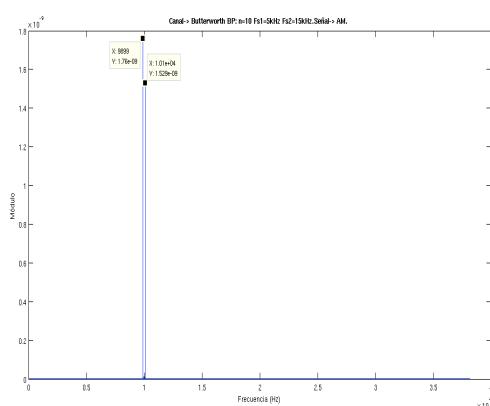
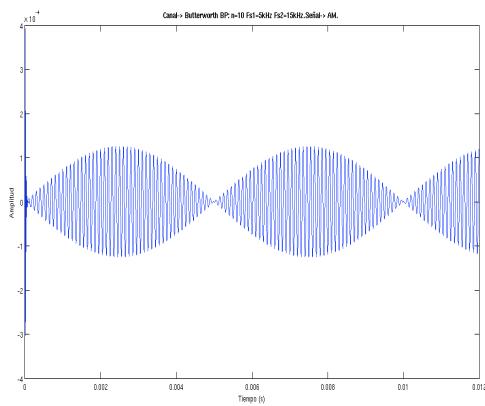
○ Orden 2



○ Orden 4

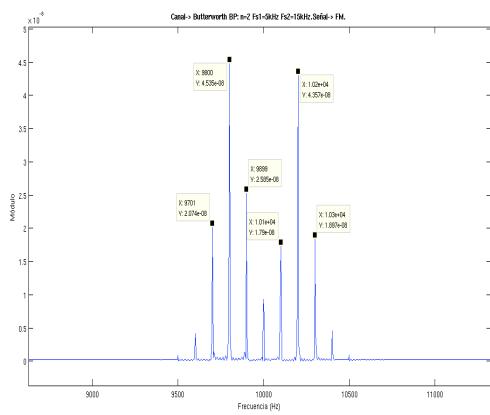
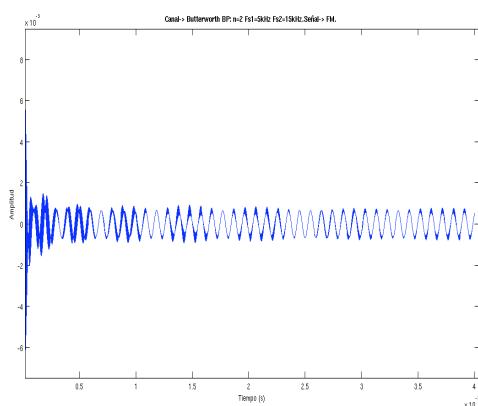


○ Orden 10

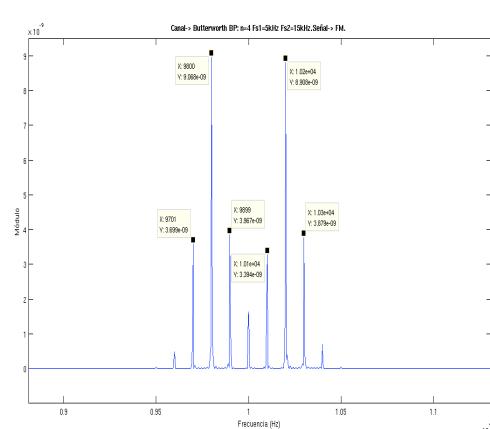
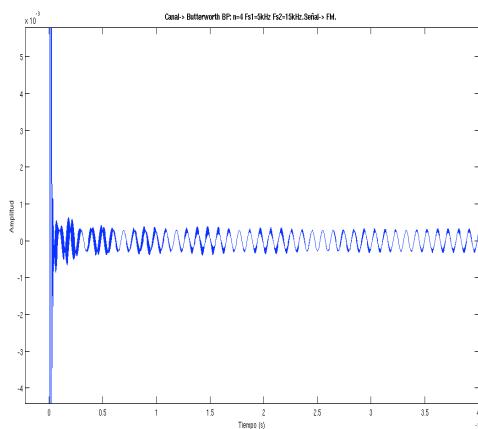


g. Señal modulada FM.

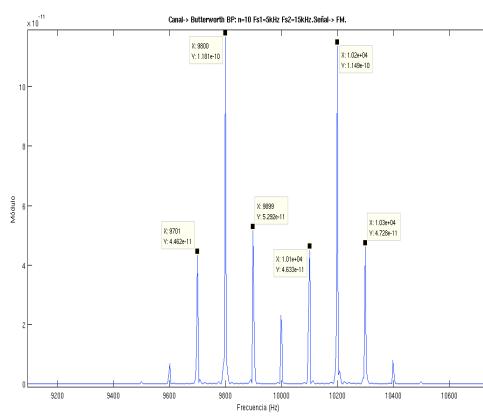
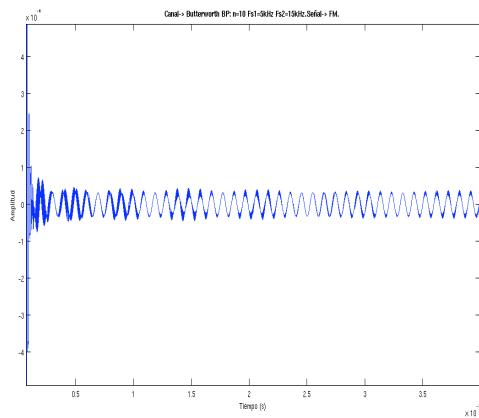
○ Orden 2



○ Orden 4



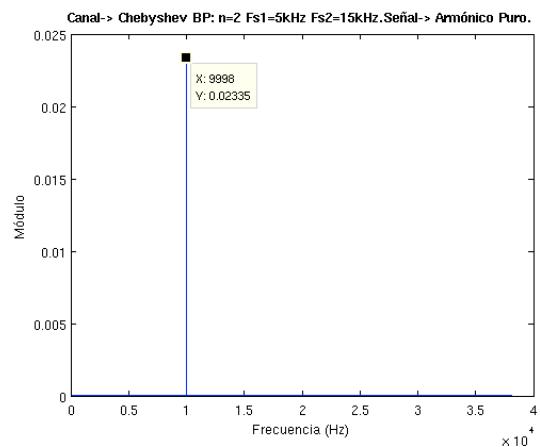
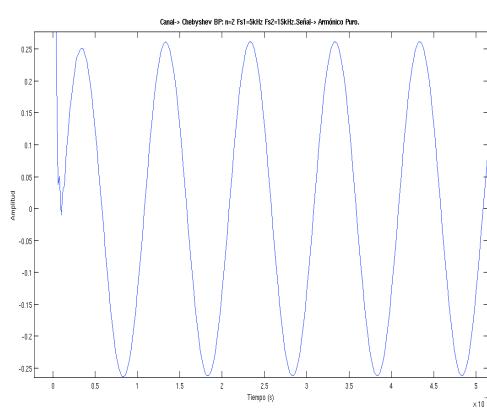
- Orden 10



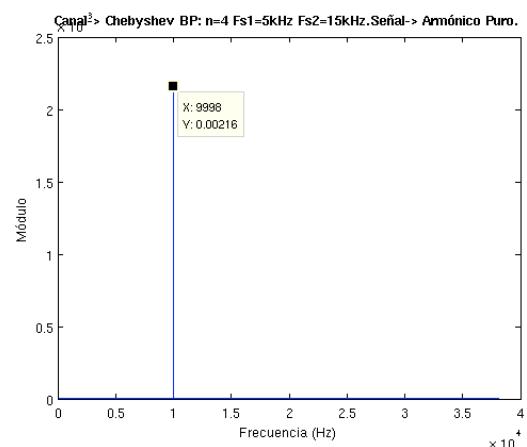
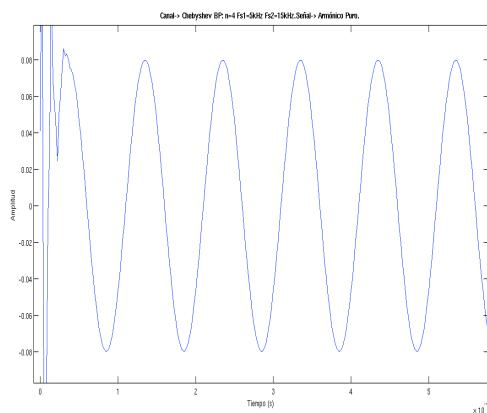
A.1.2. FILTRO TIPO CHEBYSHEV

a. Armónico puro.

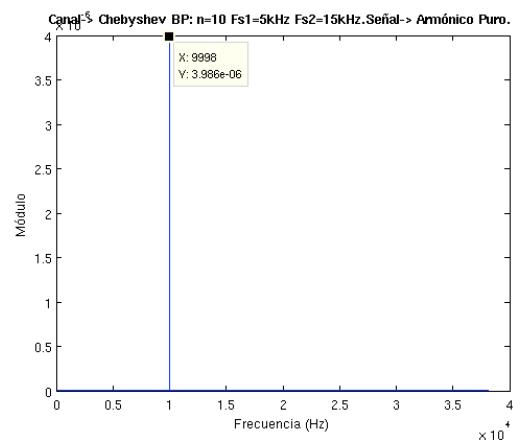
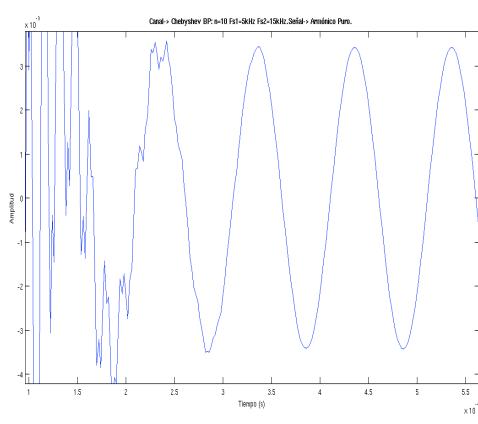
- Orden 2



- Orden 4

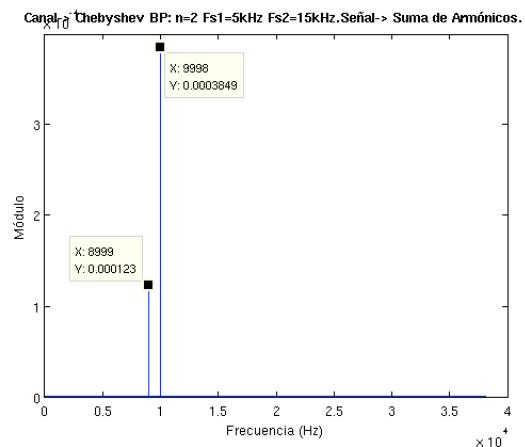
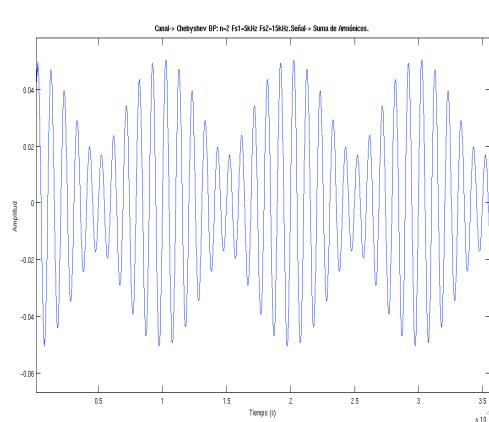


- Orden 10

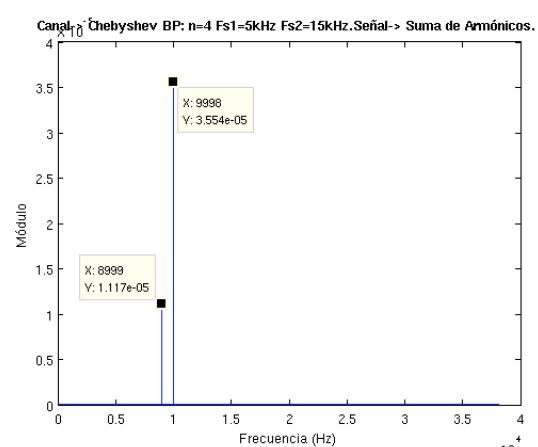
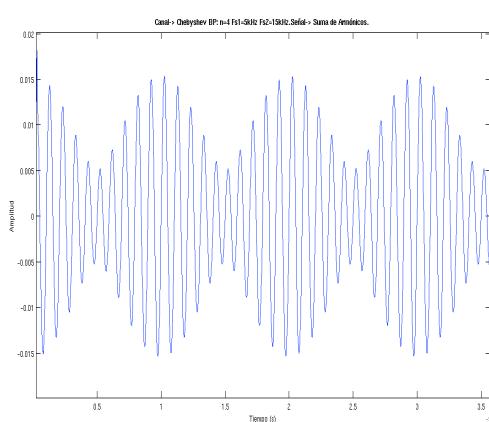


b. Suma de armónicos.

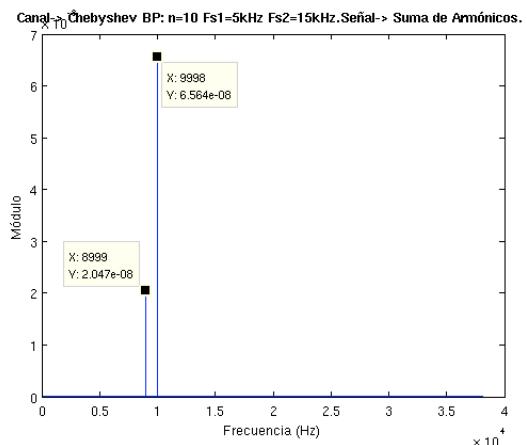
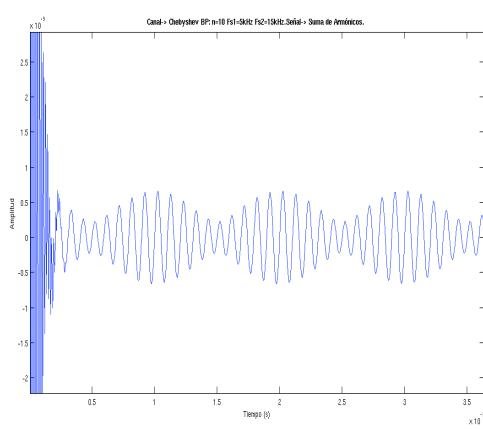
- Orden 2



- Orden 4

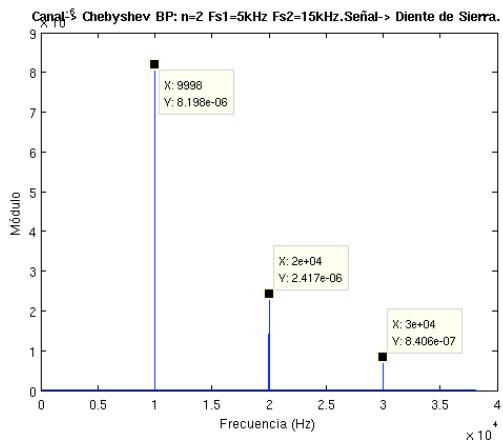
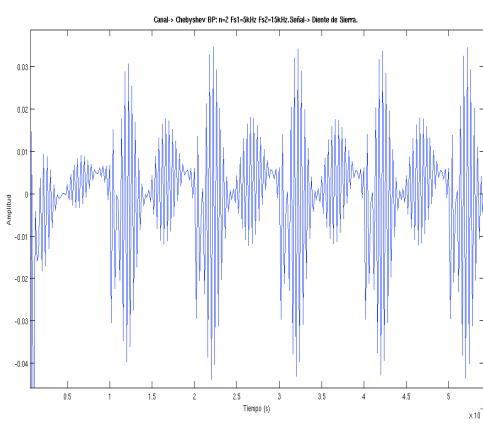


- Orden 10

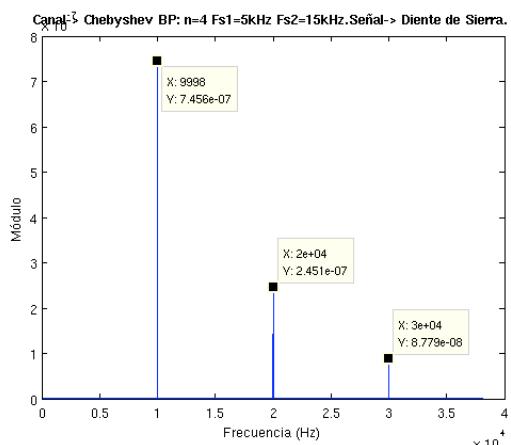
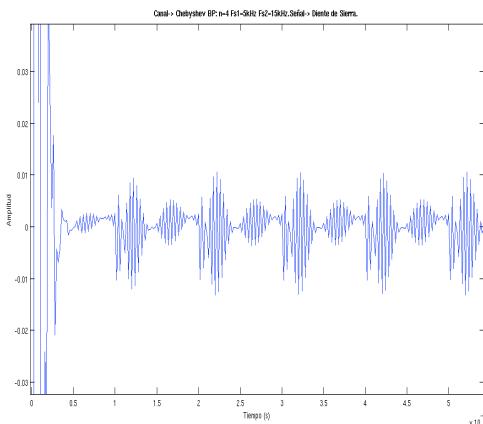


c. Diente de sierra.

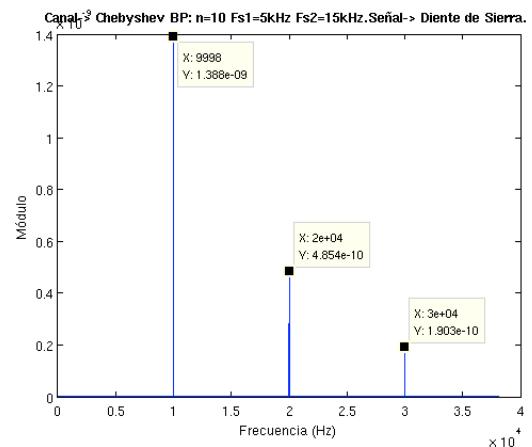
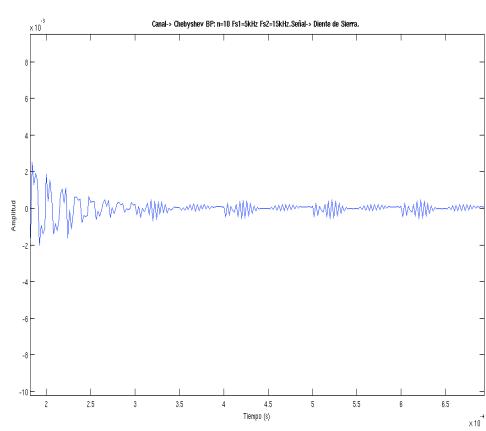
- Orden 2



- Orden 4

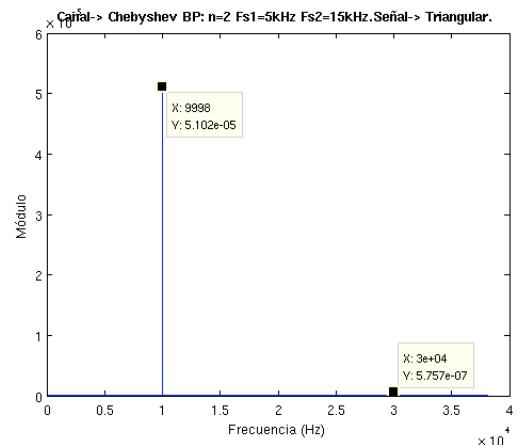
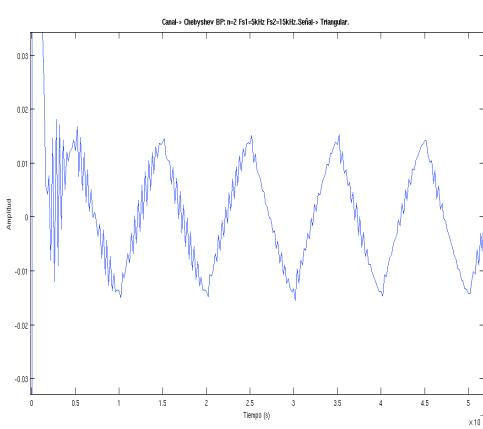


○ Orden 10

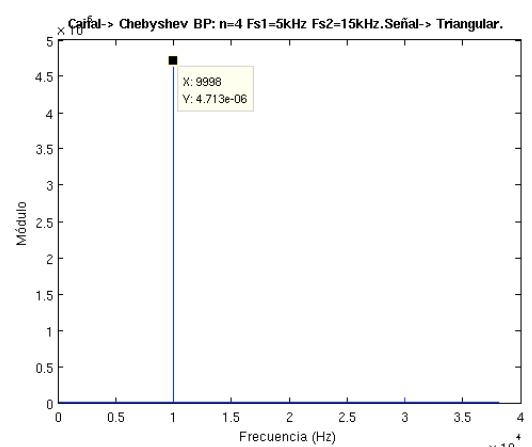
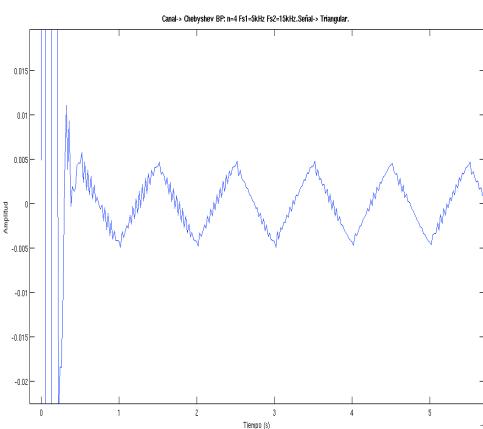


d. Triangular.

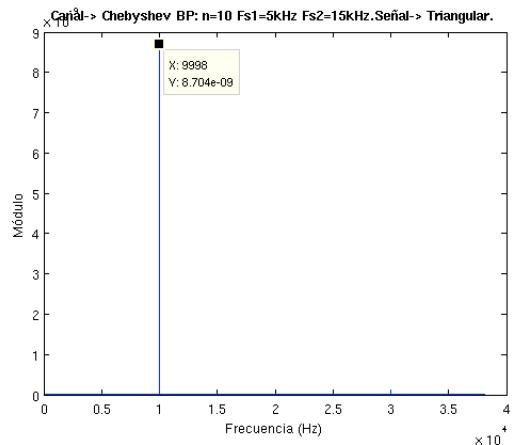
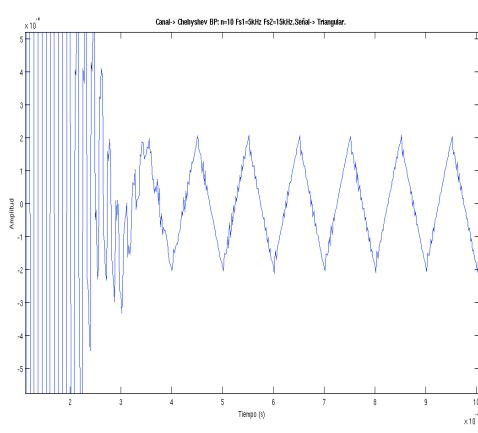
○ Orden 2



○ Orden 4

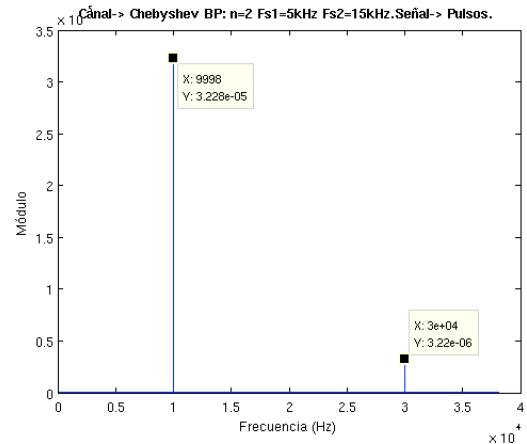
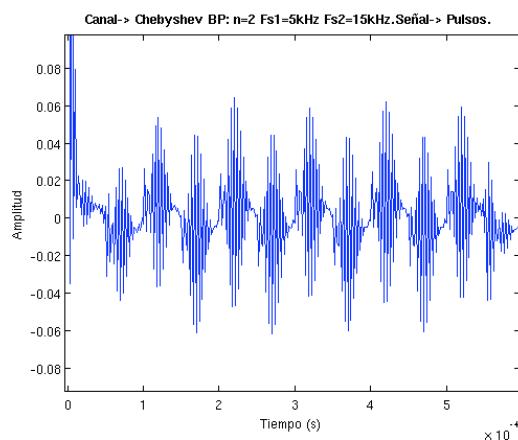


- Orden 10

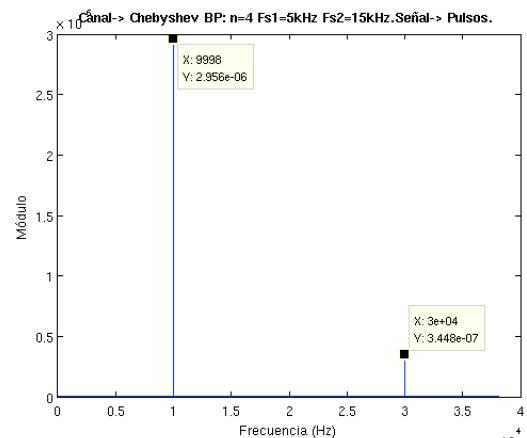
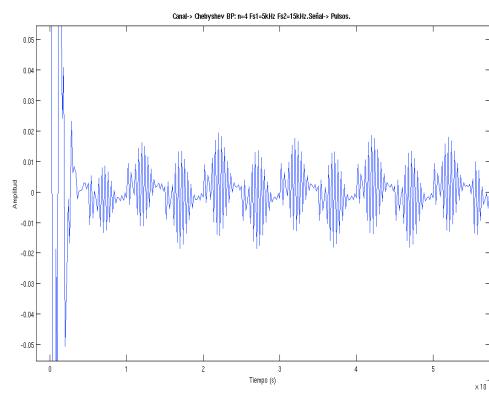


e. Pulsos.

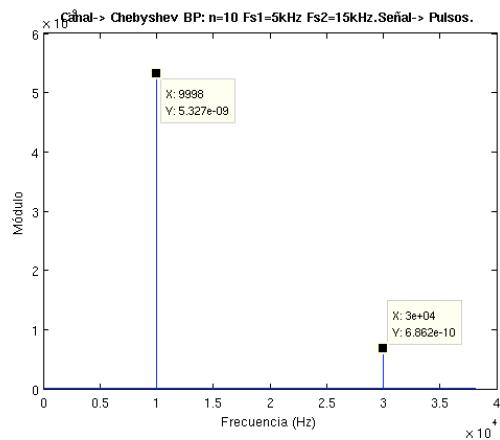
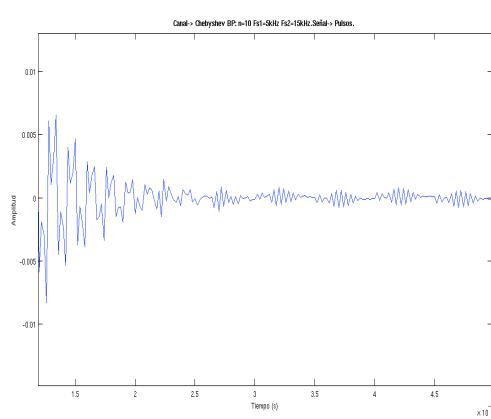
- Orden 2



- Orden 4

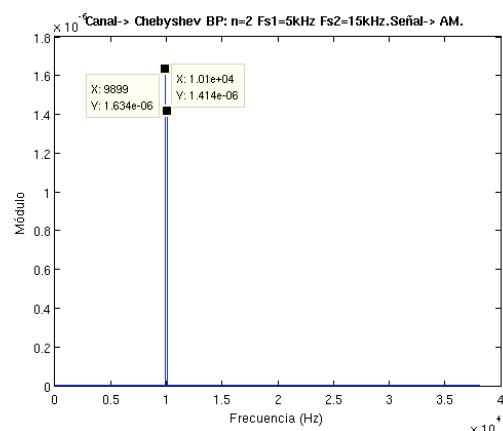
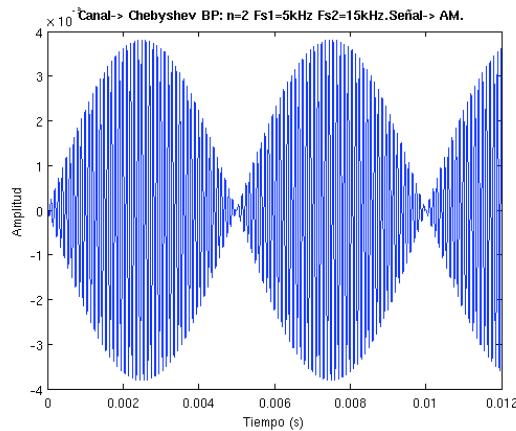


- Orden 10

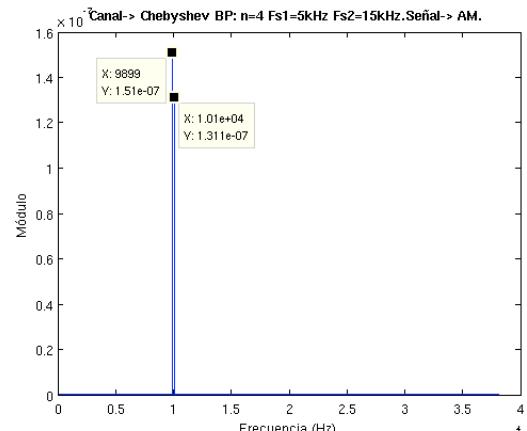
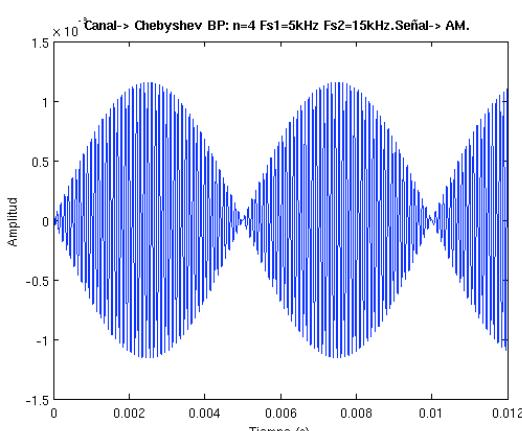


f. Señal modulada AM.

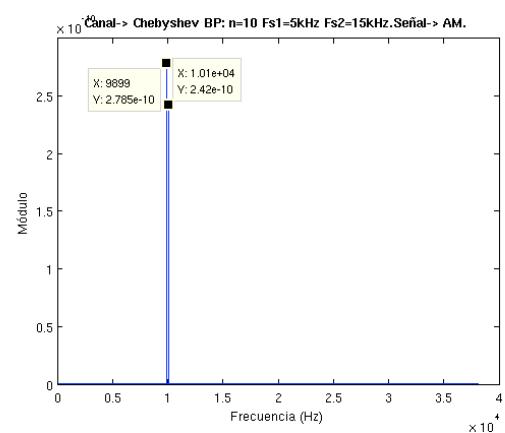
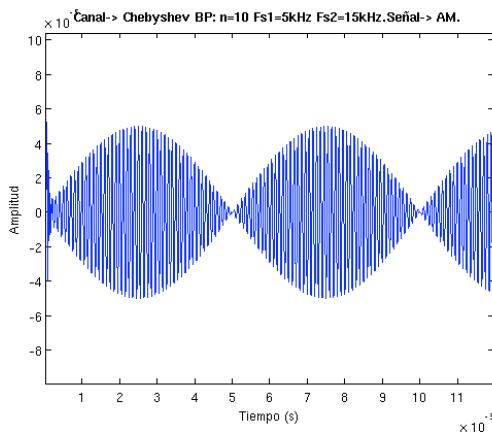
- Orden 2



- Orden 4

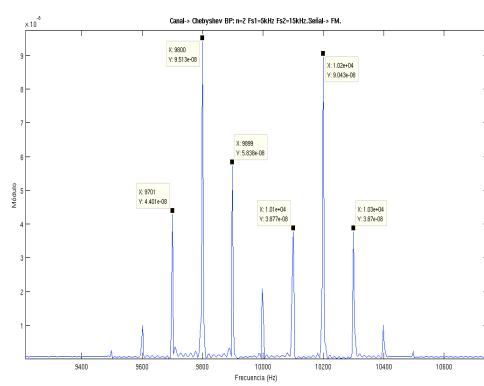
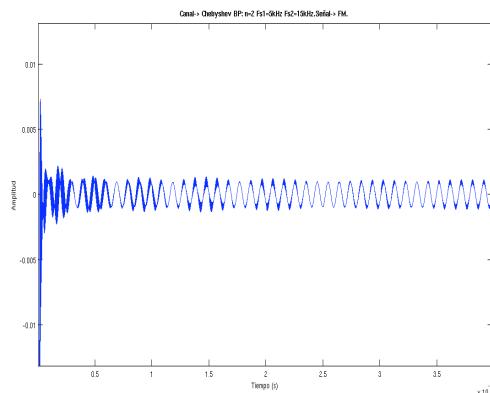


○ Orden 10

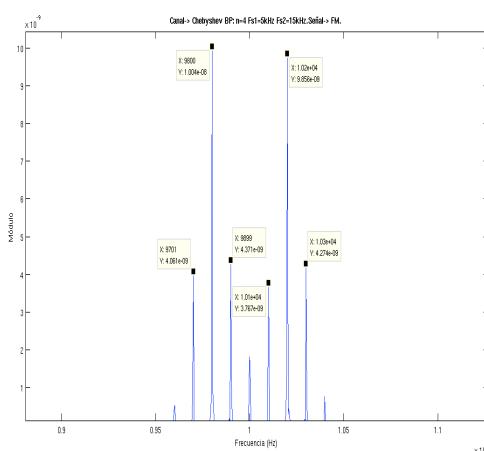
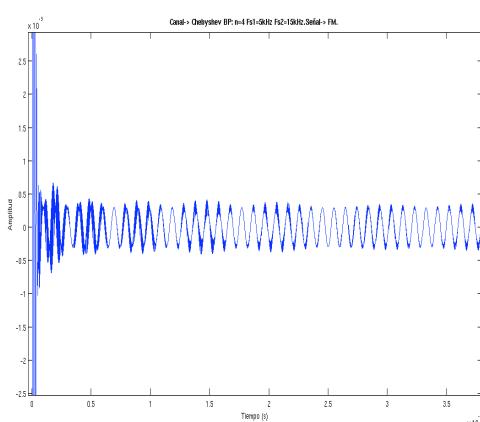


g. Señal modulada FM.

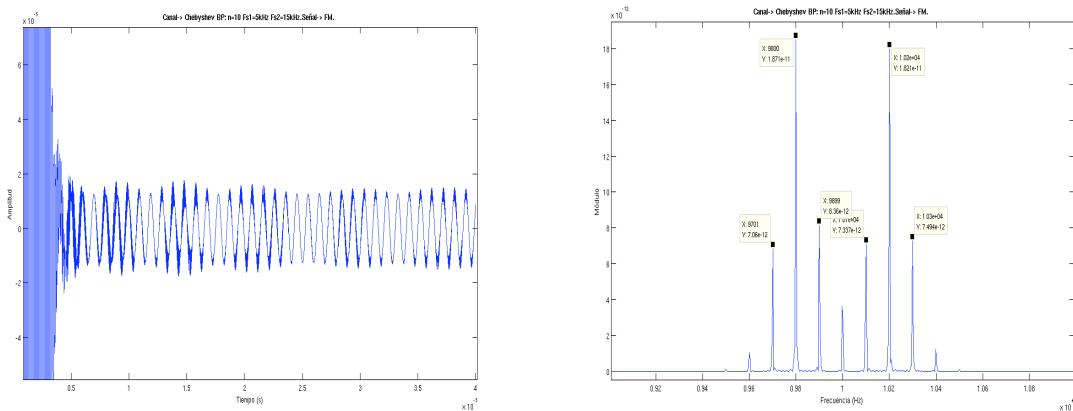
○ Orden 2



○ Orden 4



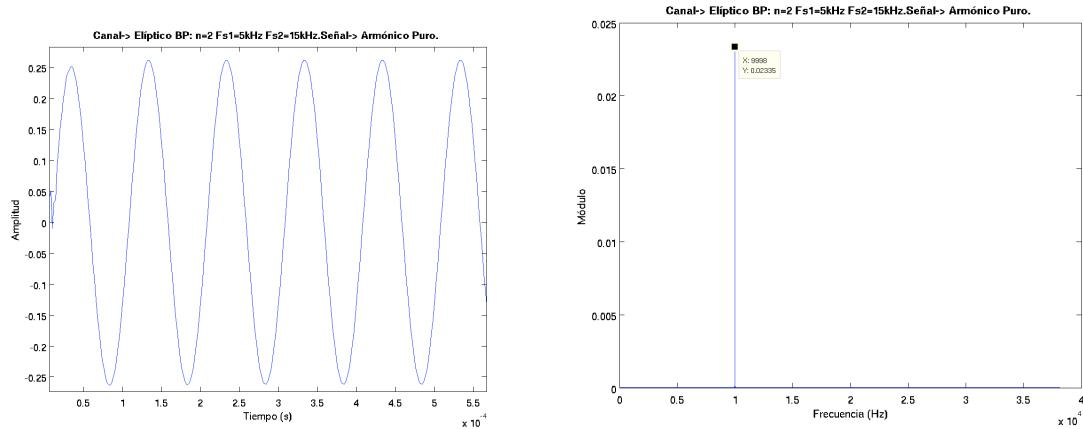
- Orden 10



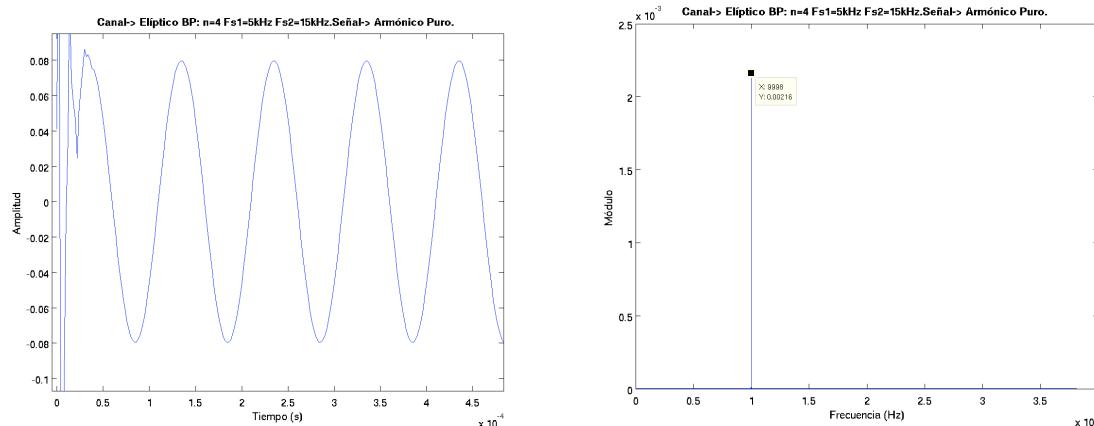
A.1.3. FILTRO TIPO ELÍPTICO.-

a. Armónico puro.

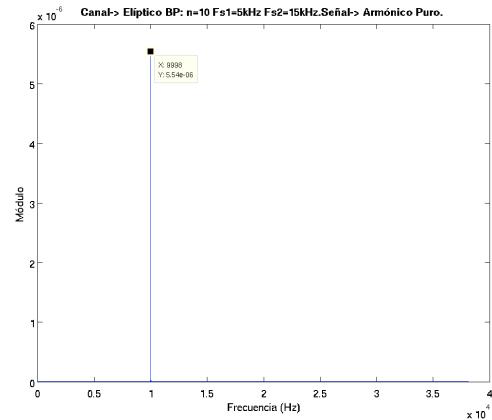
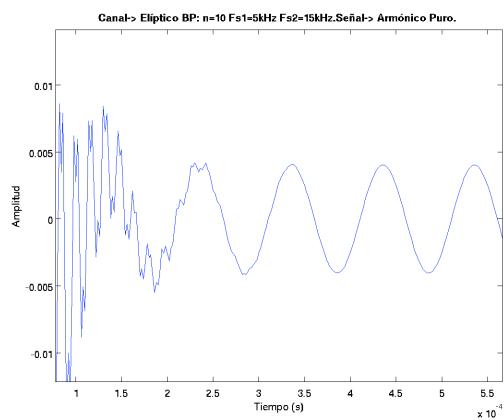
- Orden 2



- Orden 4

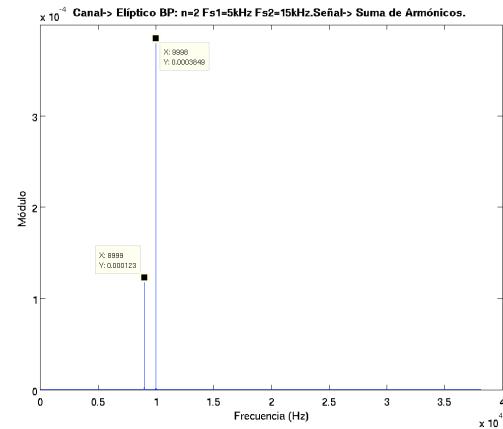
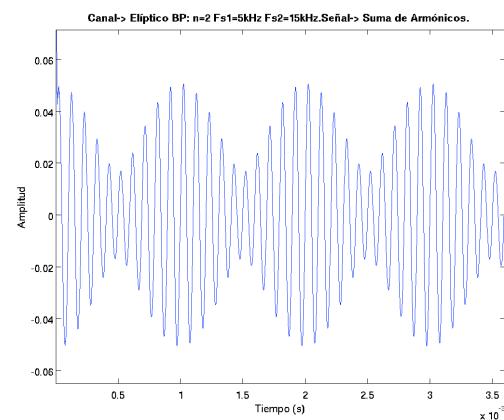


- Orden 10

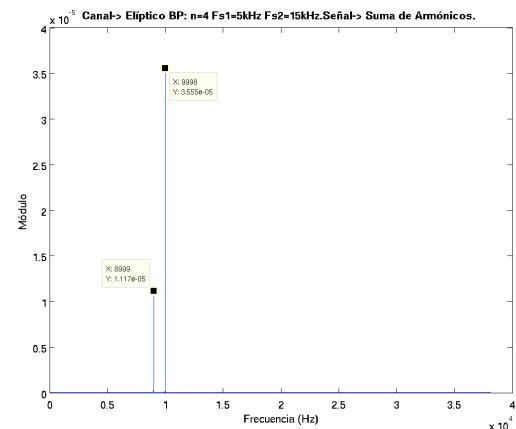
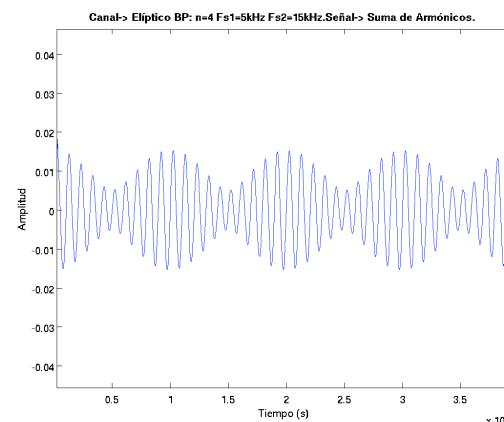


b. Suma de armónicos.

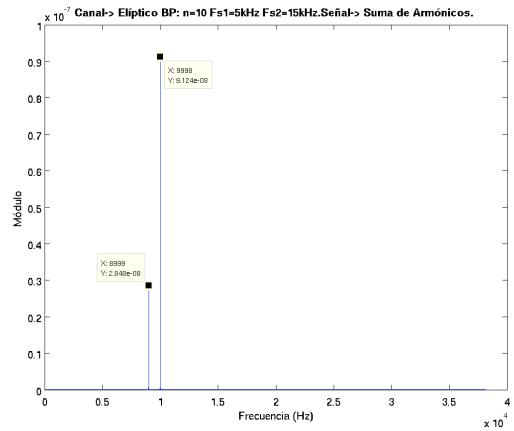
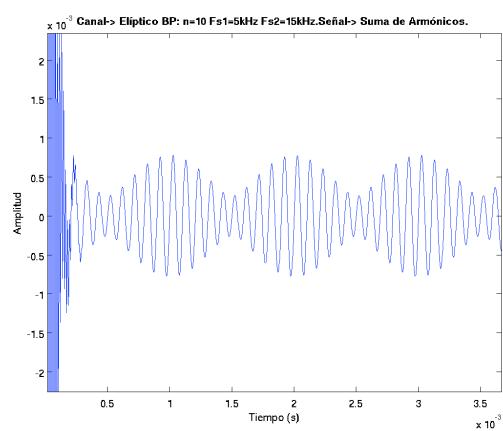
- Orden 2



- Orden 4

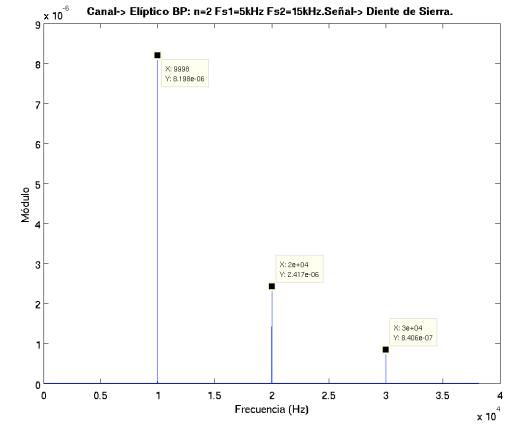
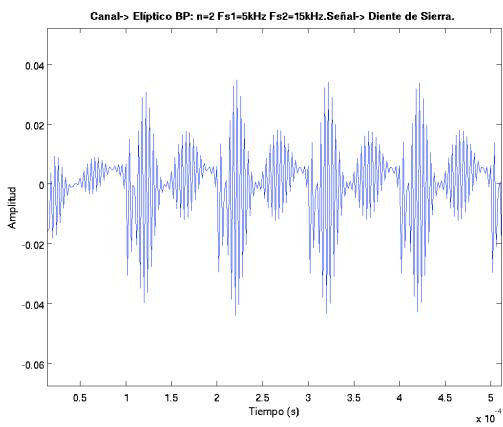


- Orden 10

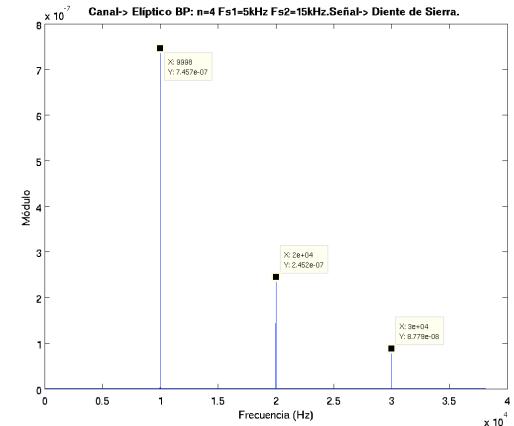
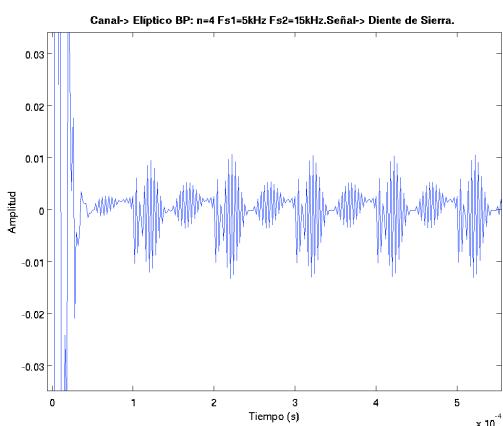


C. Diente de sierra.

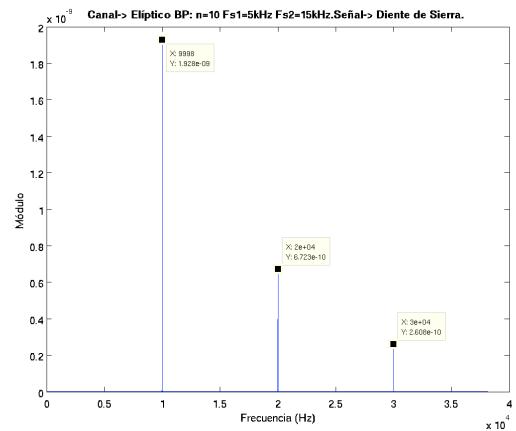
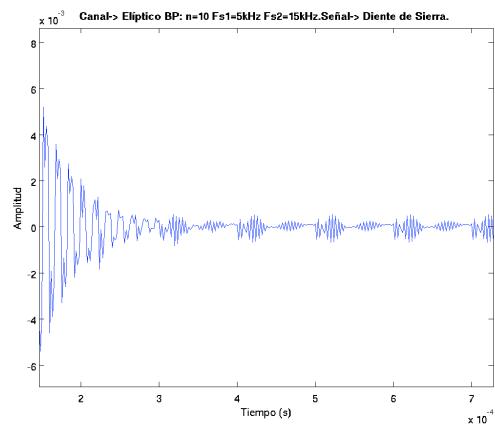
- Orden 2



- Orden 4

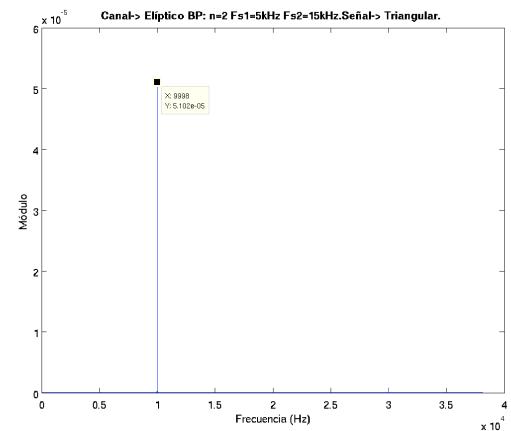
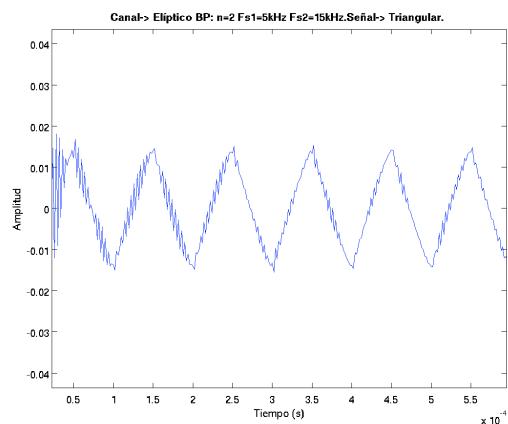


- Orden 10

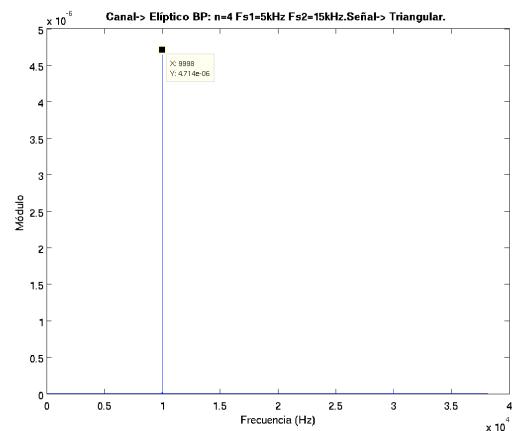
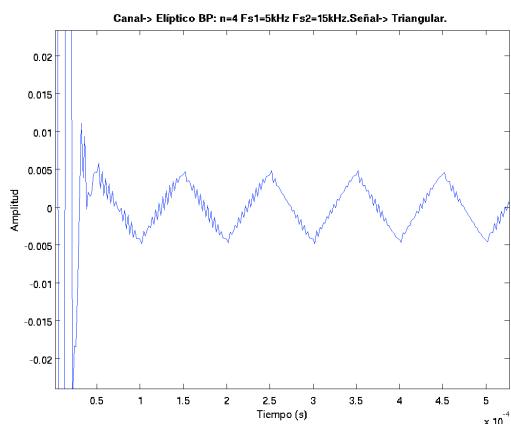


d. Triangular.

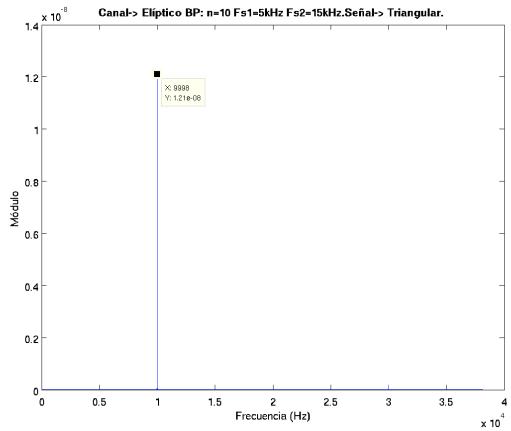
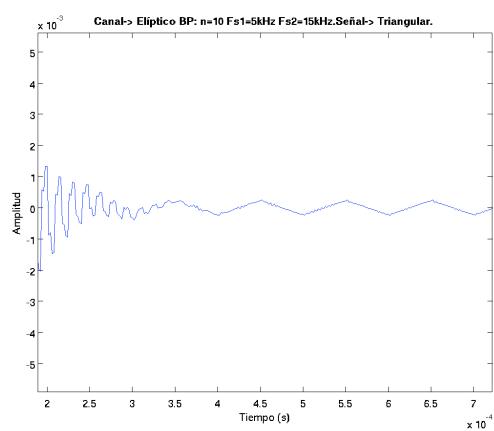
- Orden 2



- Orden 4

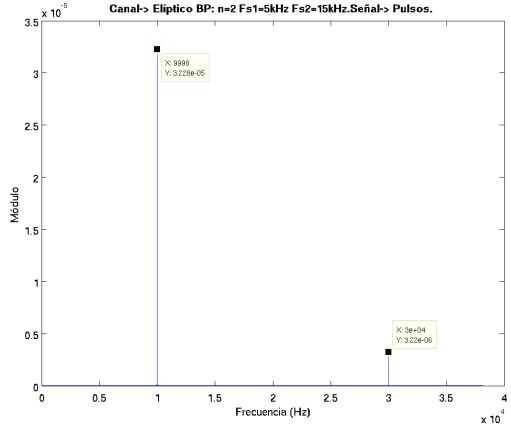
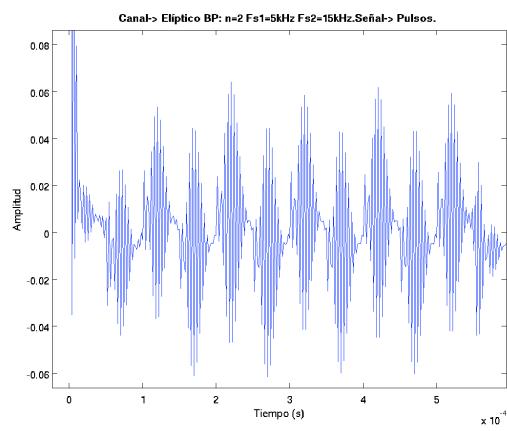


- Orden 10

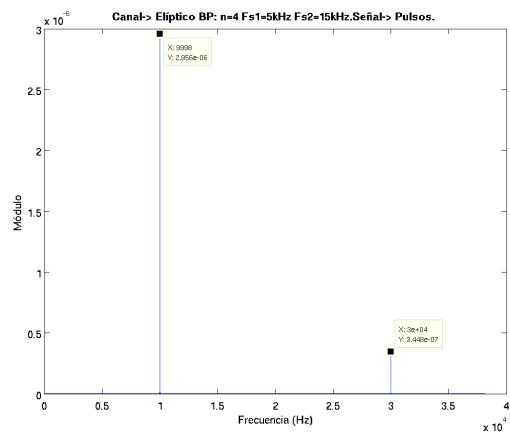
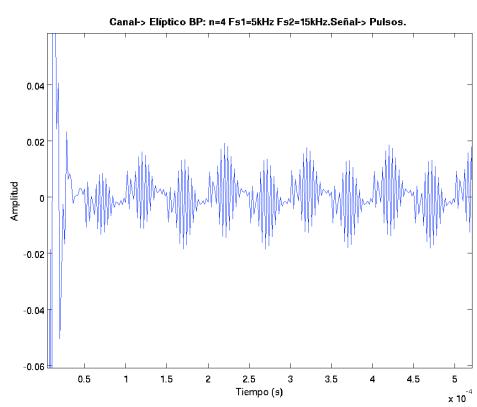


e. Pulsos.

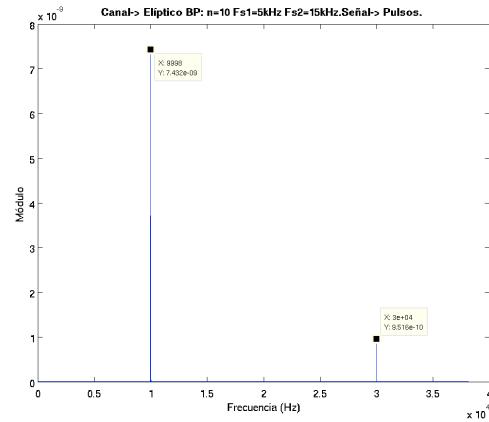
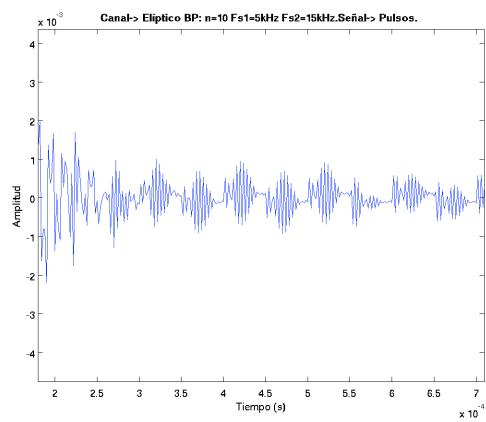
- Orden 2



- Orden 4

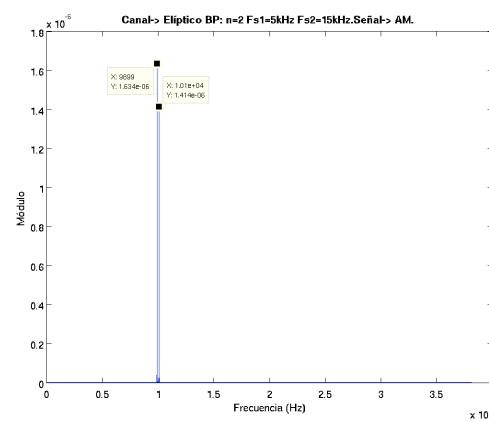
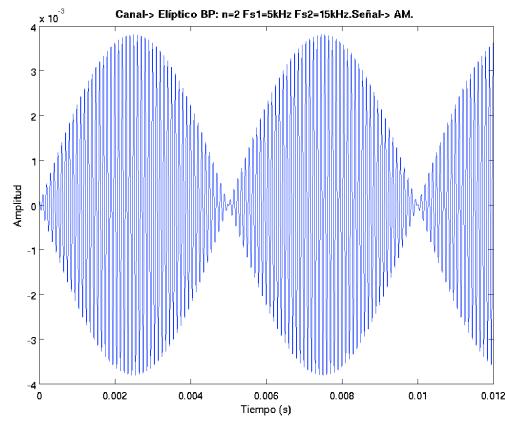


○ Orden 10

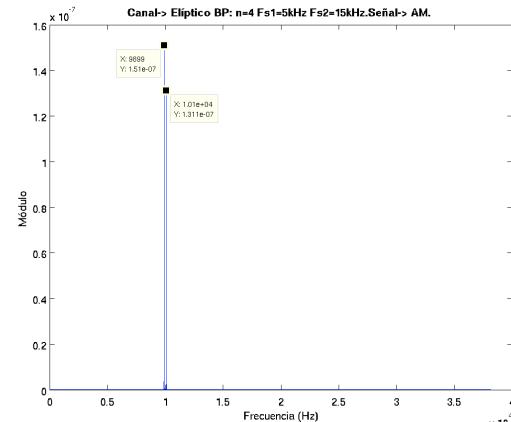
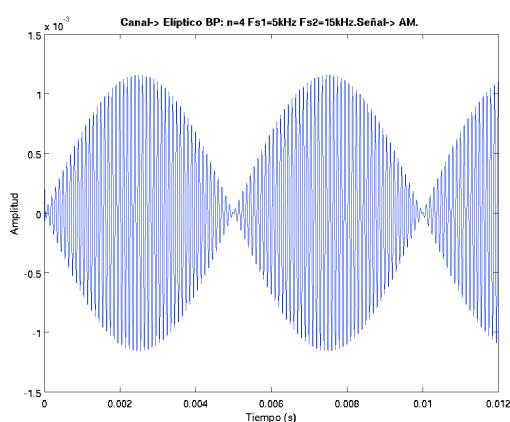


f. Señal modulada AM.

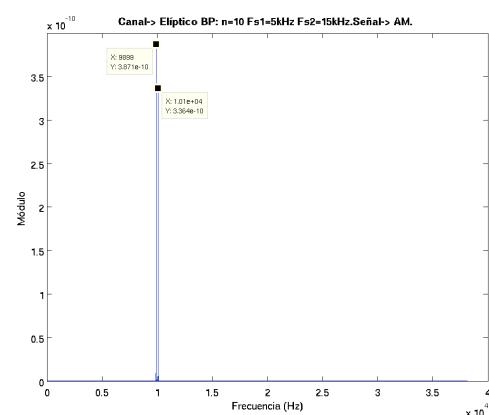
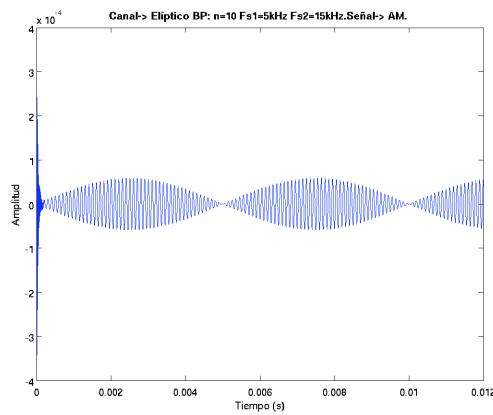
○ Orden 2



○ Orden 4

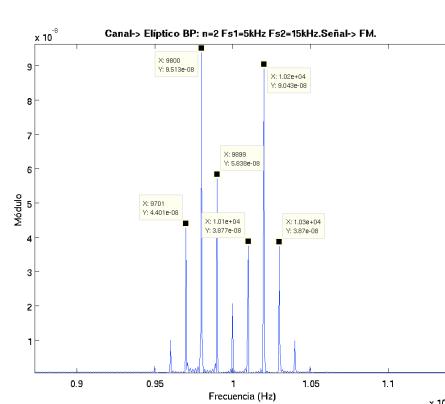
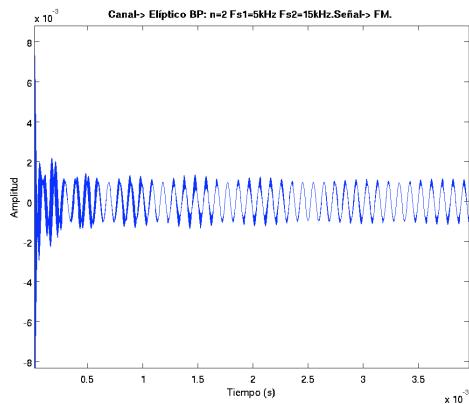


- Orden 10

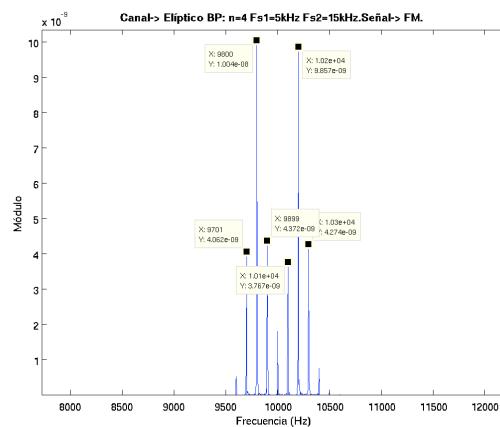
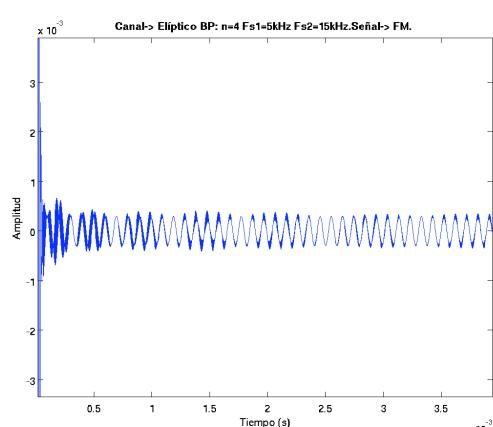


g. Señal modulada FM.

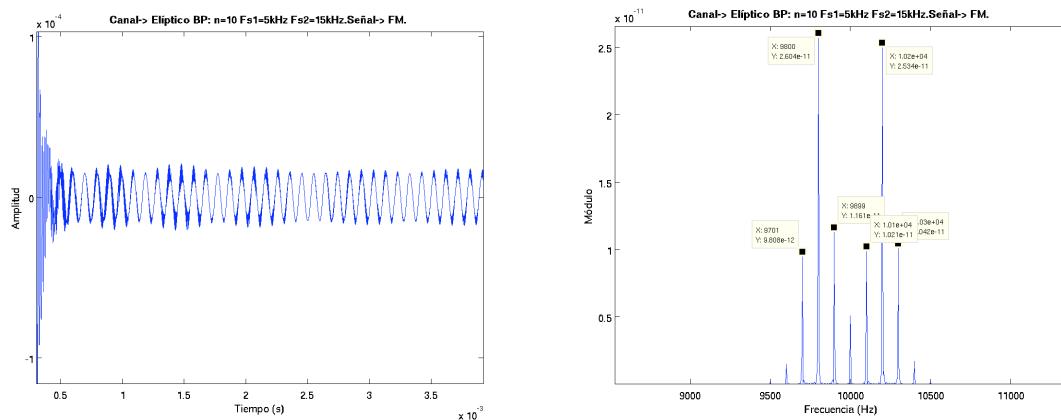
- Orden 2



- Orden 4



- *Orden 10*

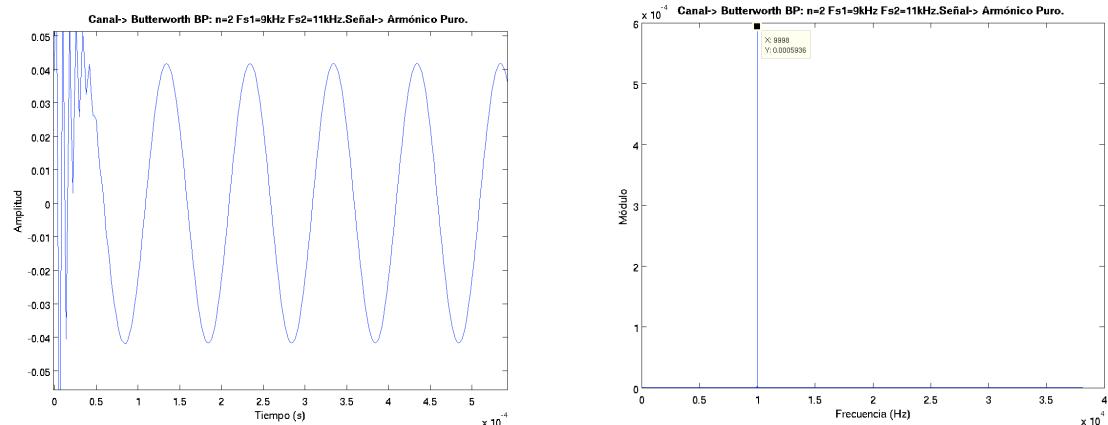


A.2. CANAL ESTRECHO (BP: 9 KHZ – 11 KHZ)

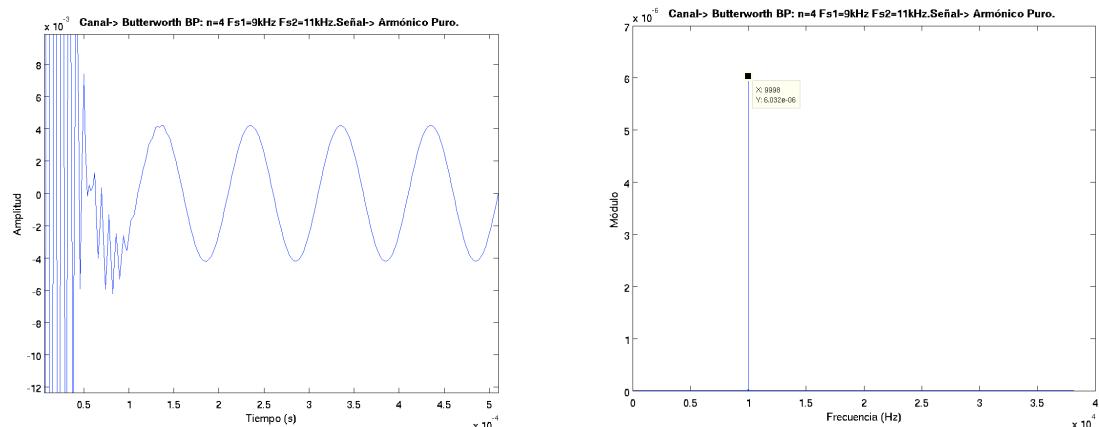
A.2.1. FILTRO TIPO BUTTERWORTH

a. Armónico puro.

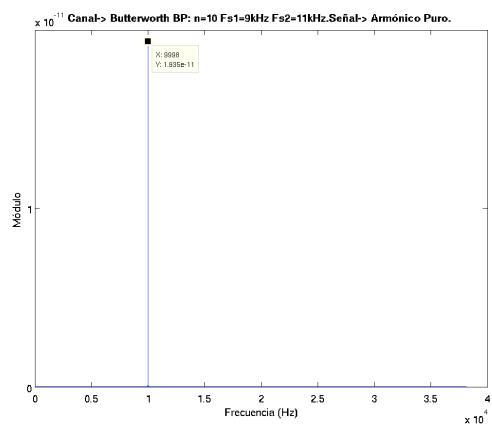
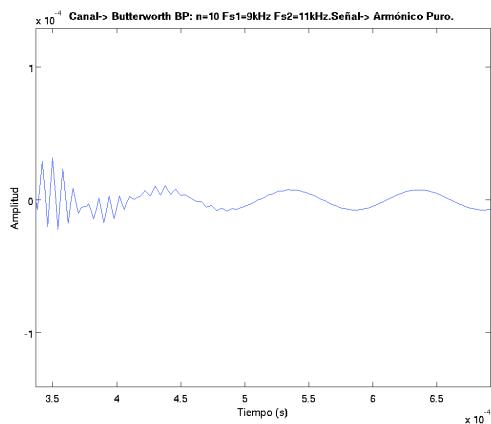
- *Orden 2*



- *Orden 4*

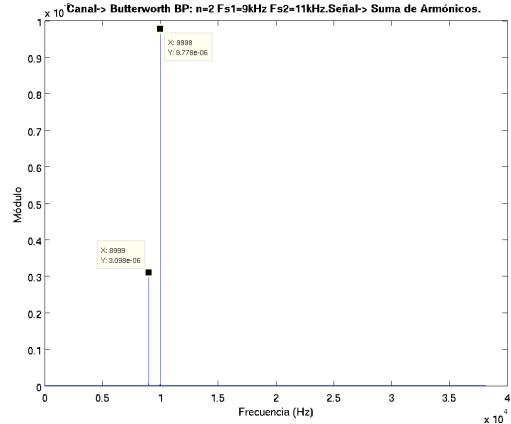
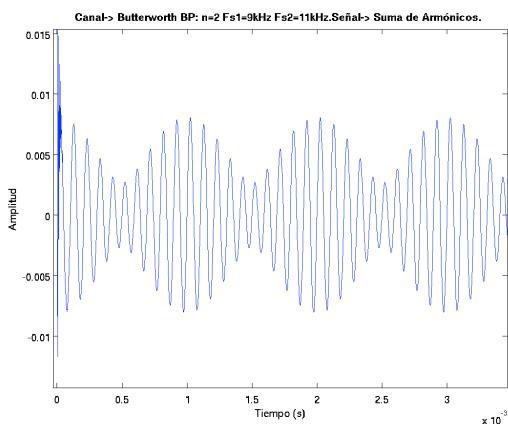


- Orden 10

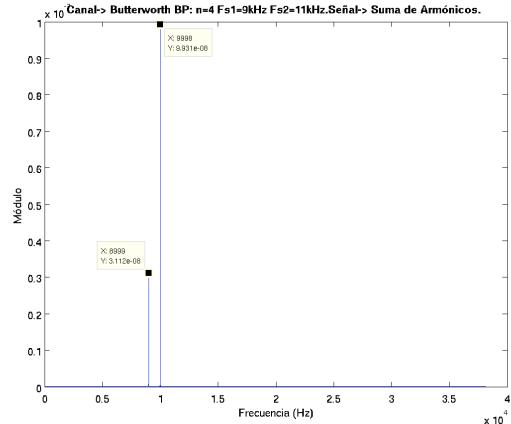
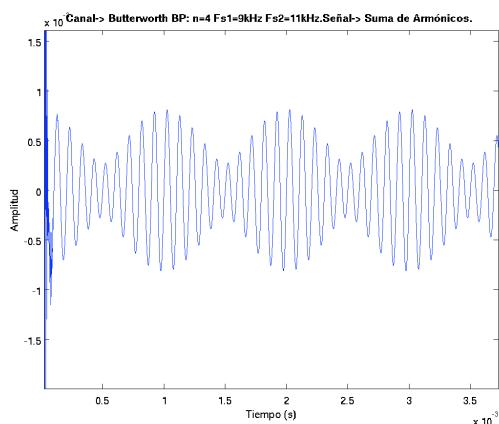


b. Suma de armónicos.

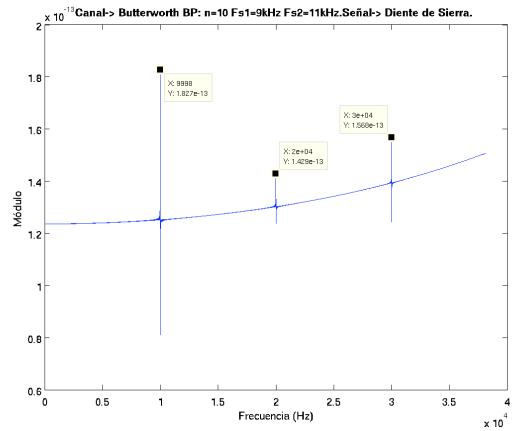
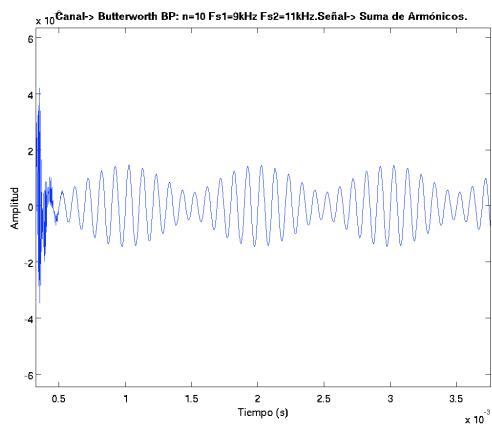
- Orden 2



- Orden 4

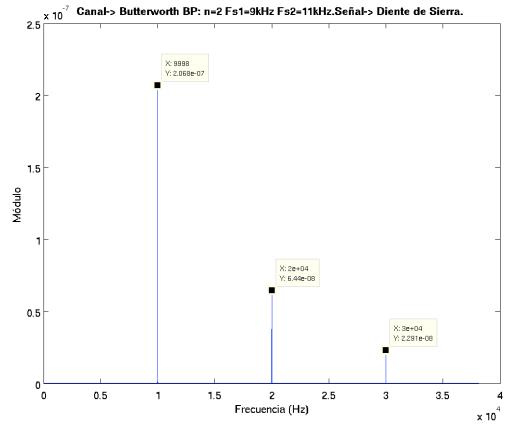
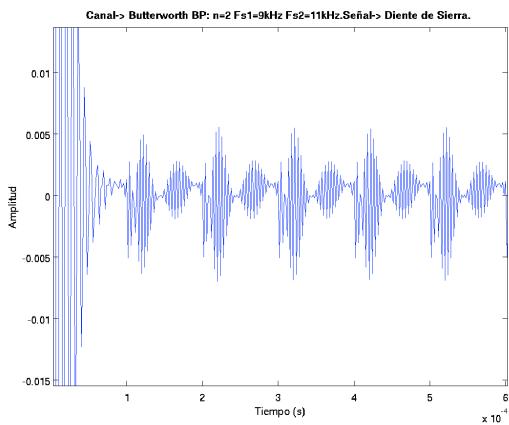


- Orden 10

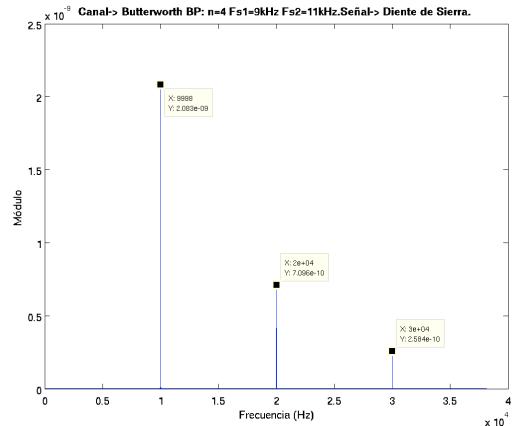
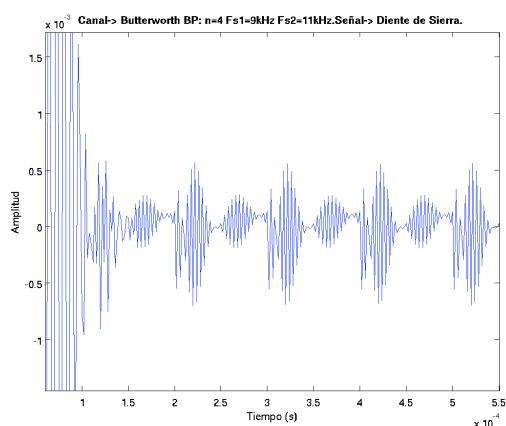


C. Diente de sierra.

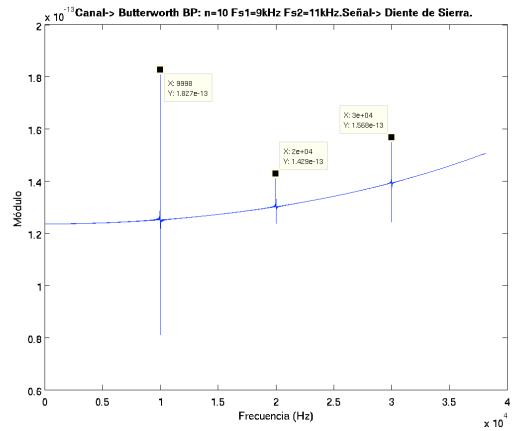
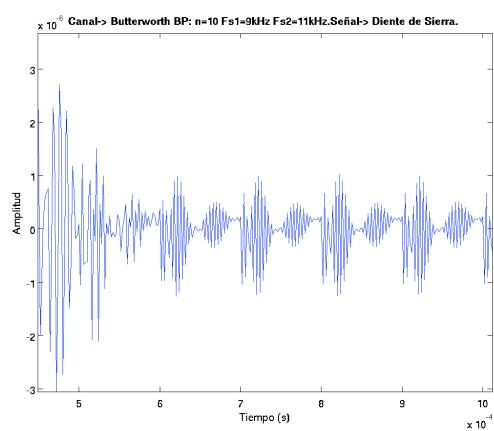
- Orden 2



- Orden 4

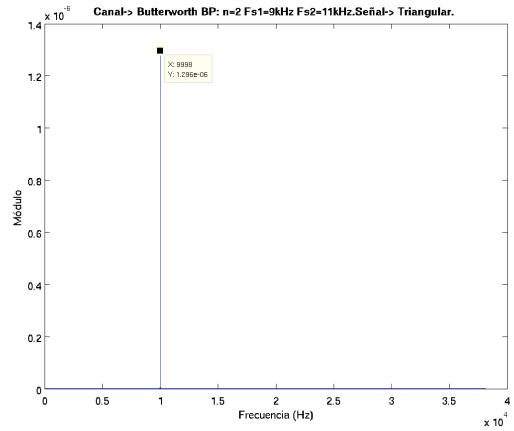
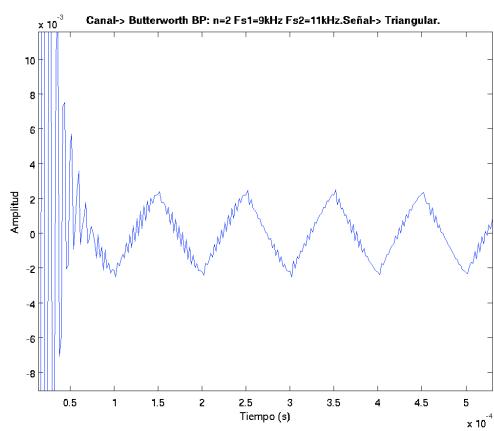


- Orden 10

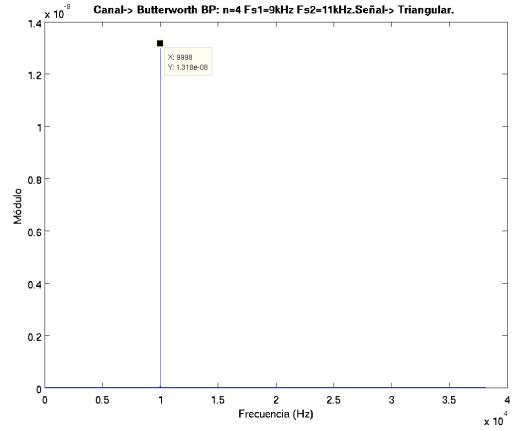
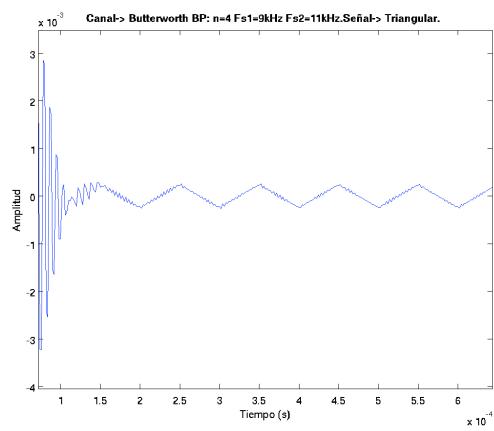


d. Triangular.

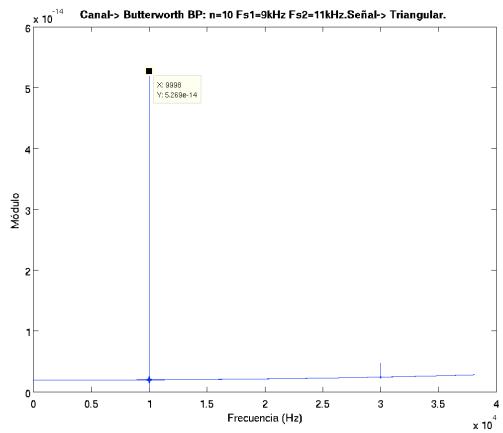
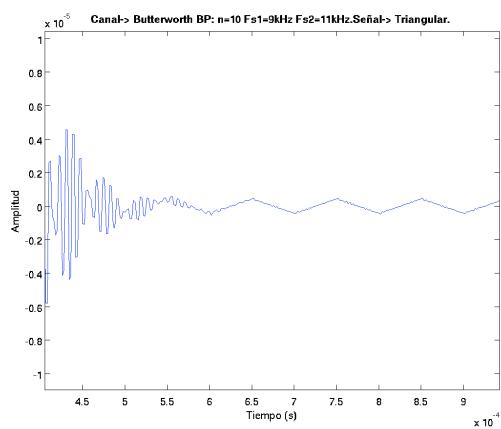
- Orden 2



- Orden 4

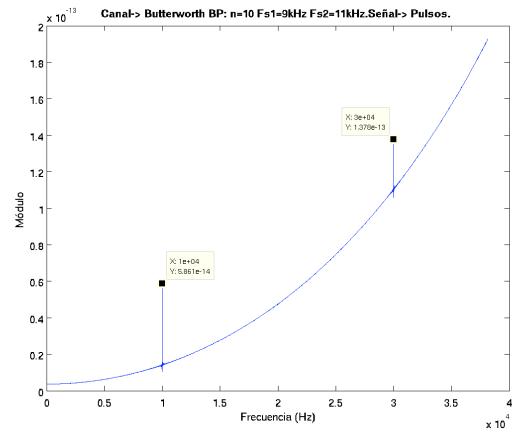
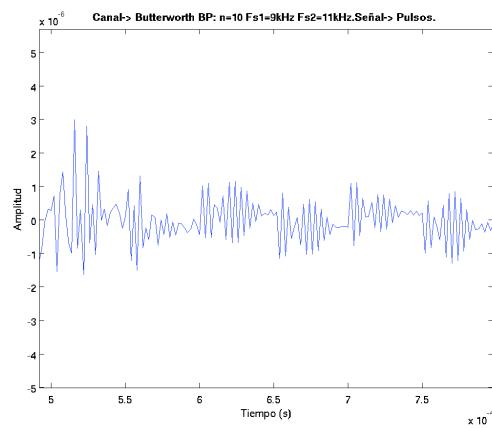


- Orden 10

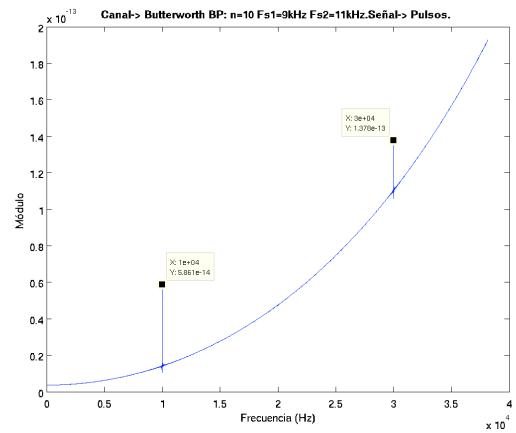
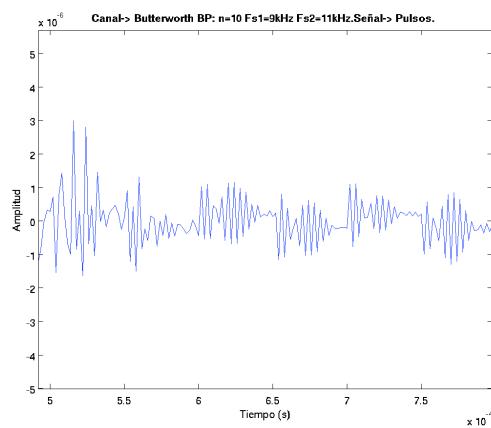


e. Pulsos.

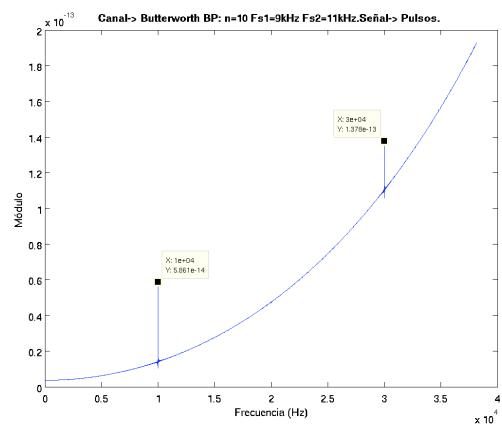
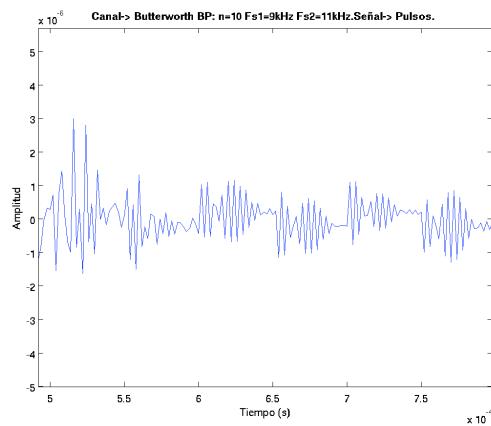
- Orden 2



- Orden 4

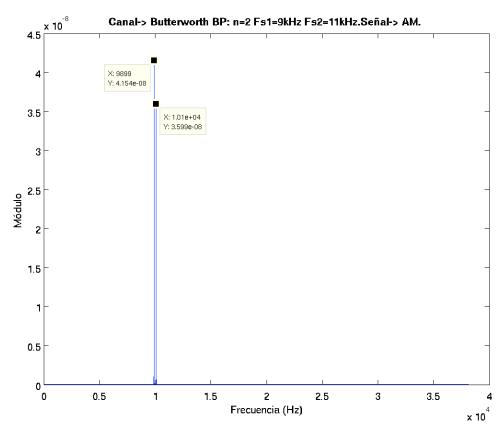
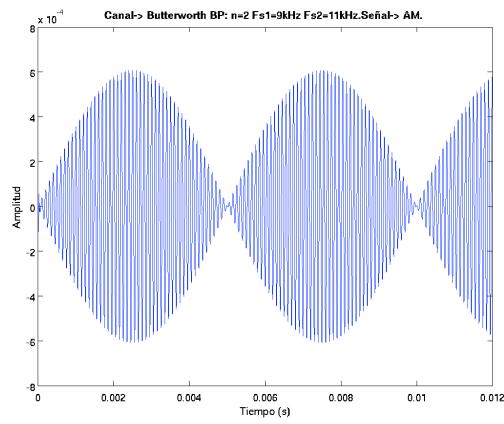


- Orden 10

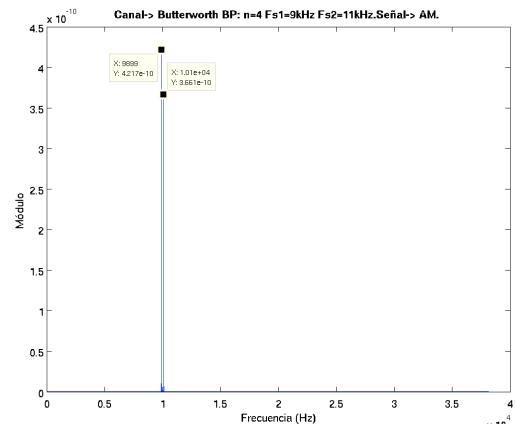
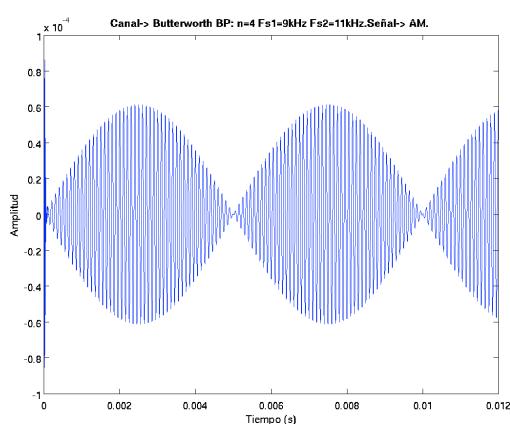


f. Señal modulada AM.

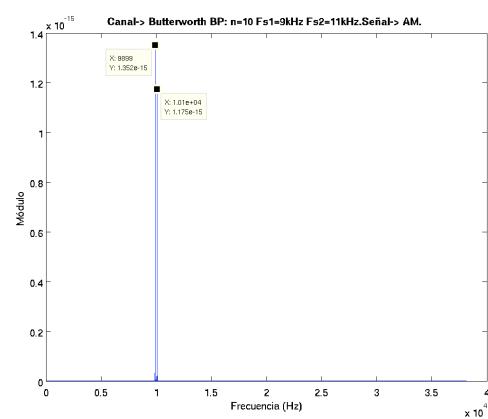
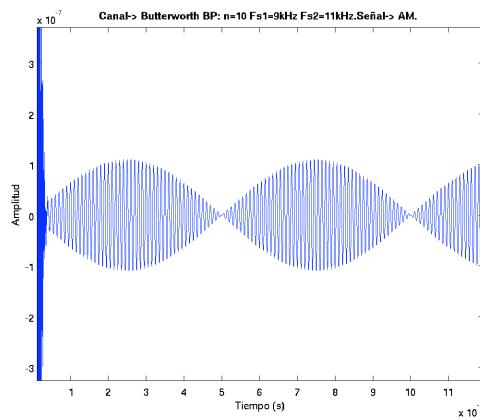
- Orden 2



- Orden 4

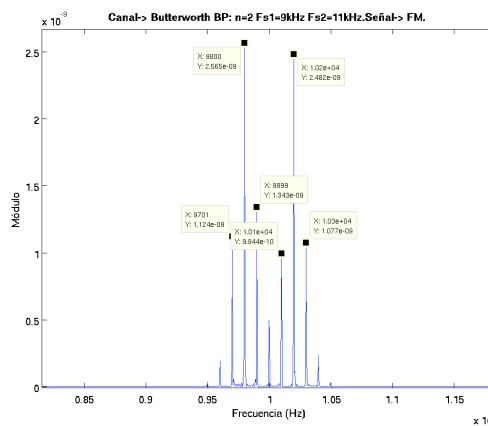
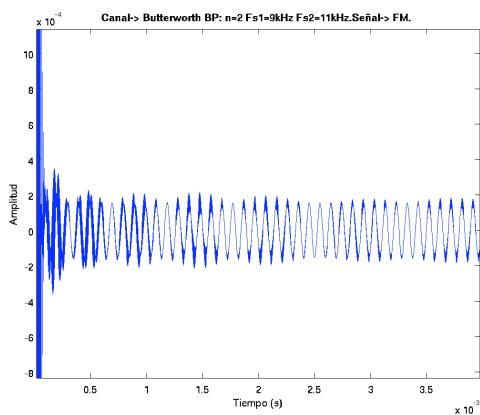


○ Orden 10

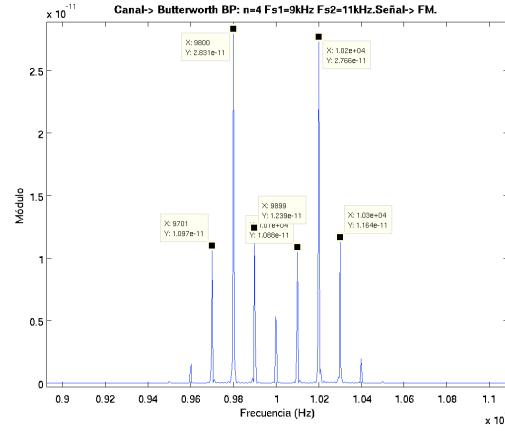
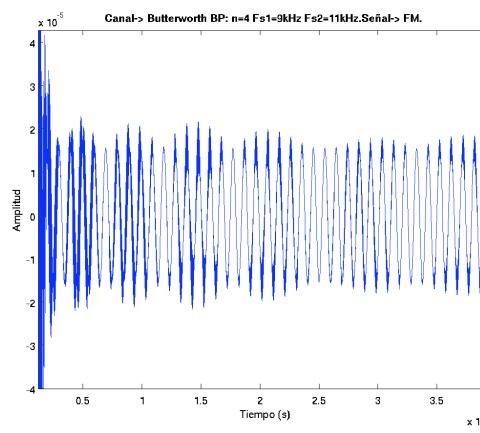


g. Señal modulada FM.

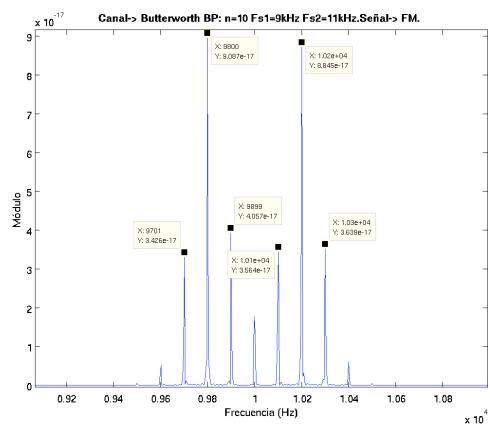
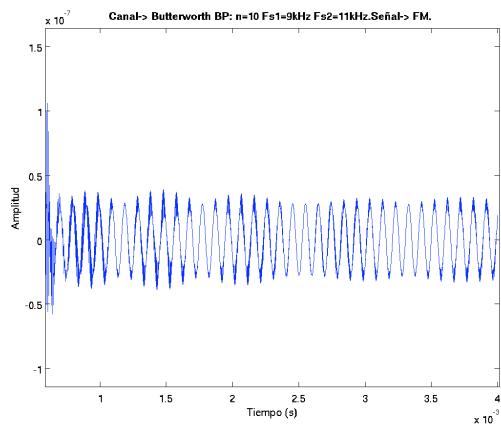
○ Orden 2



○ Orden 4



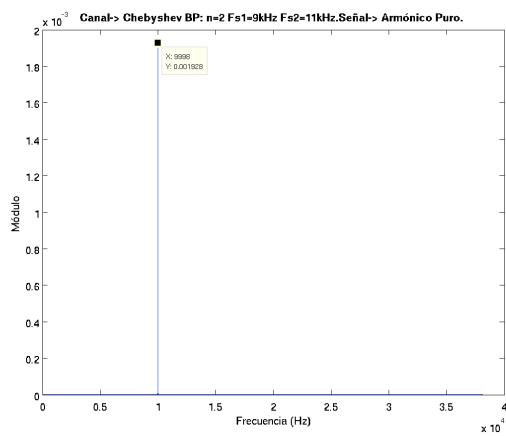
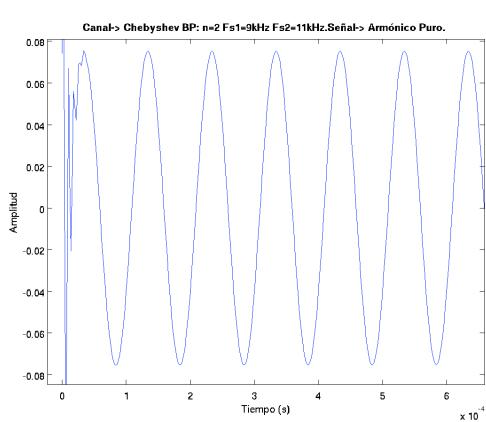
- Orden 10



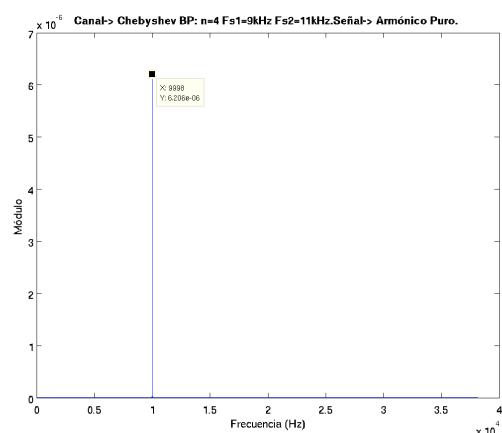
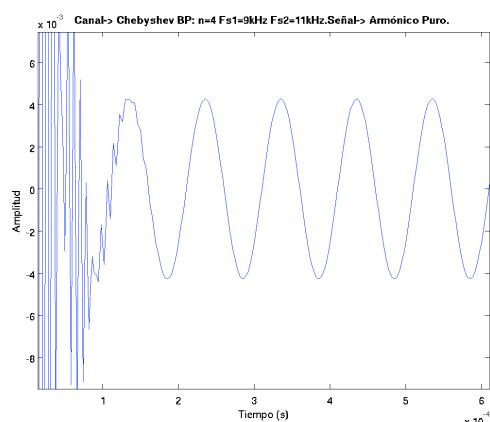
A.2.2. FILTRO TIPO CHEBYSHEV

a. Armónico puro.

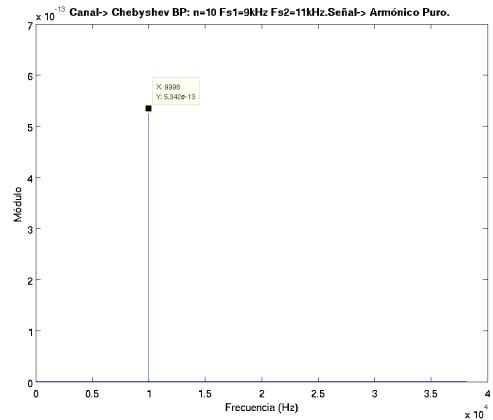
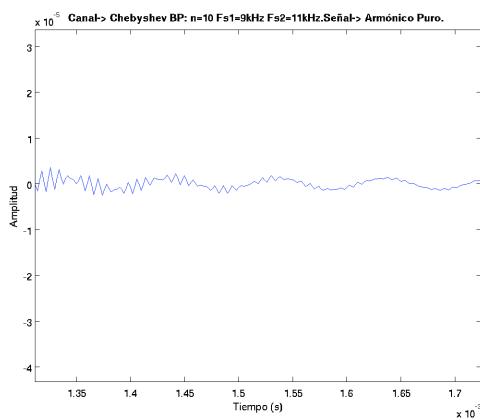
- Orden 2



- Orden 4

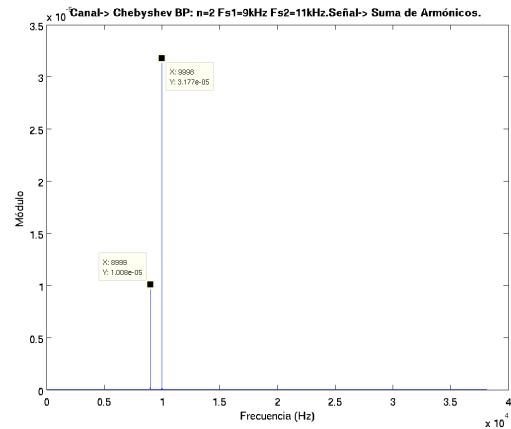
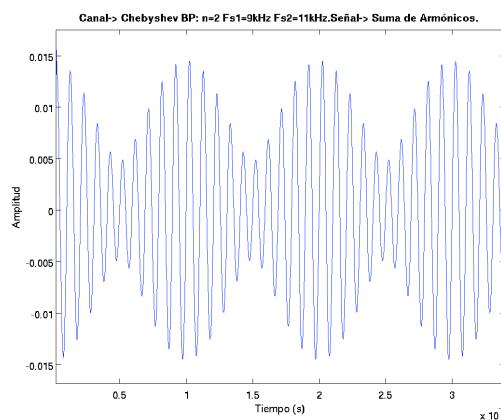


- Orden 10

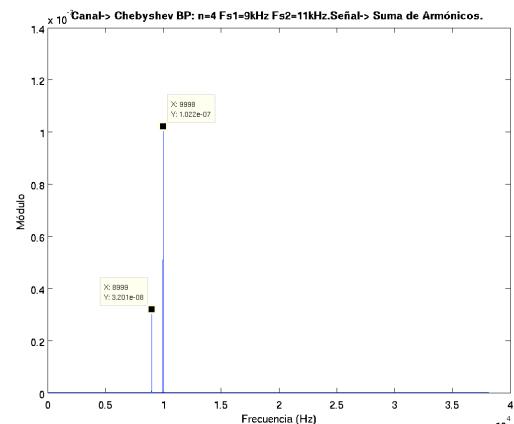
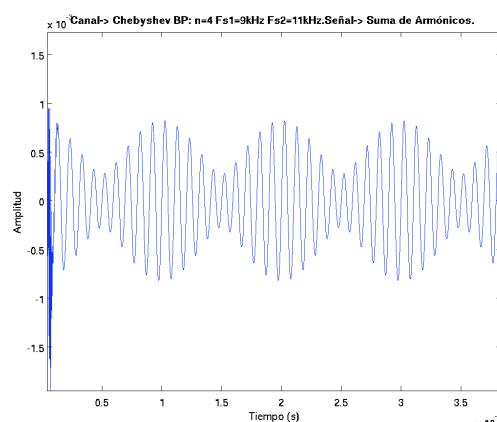


b. Suma de armónicos.

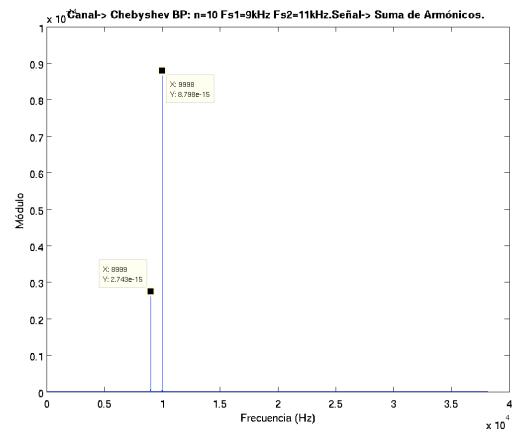
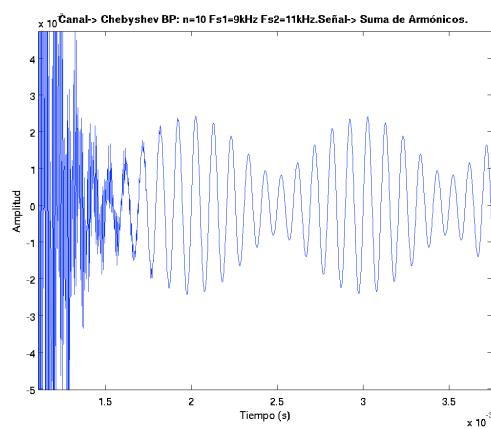
- Orden 2



- Orden 4

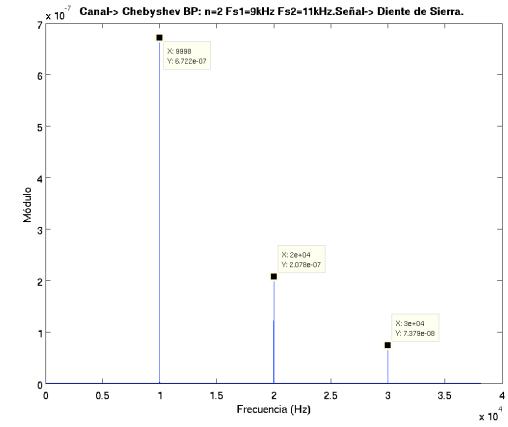
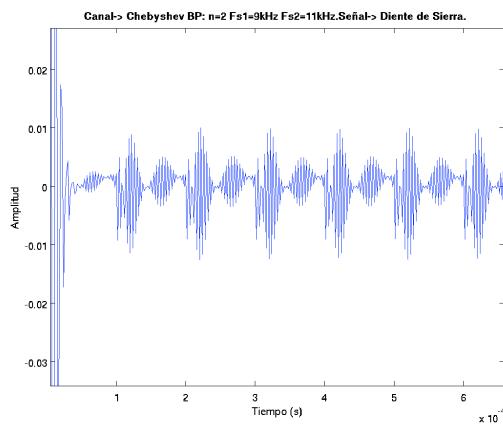


- Orden 10

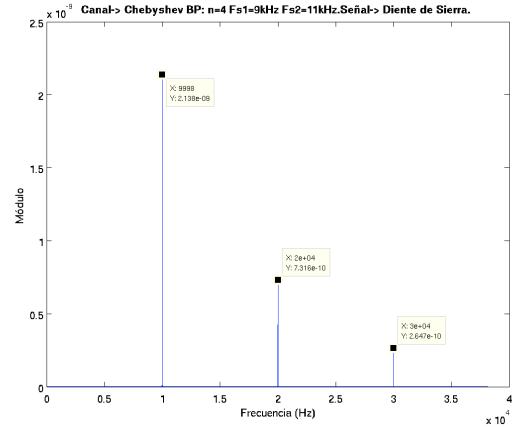
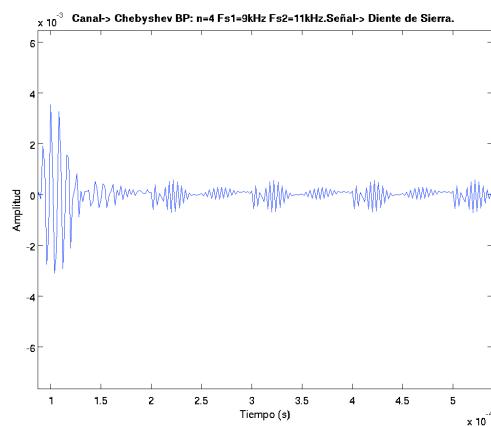


C. Diente de sierra.

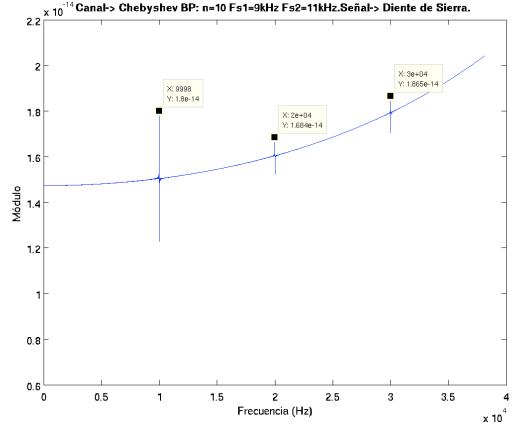
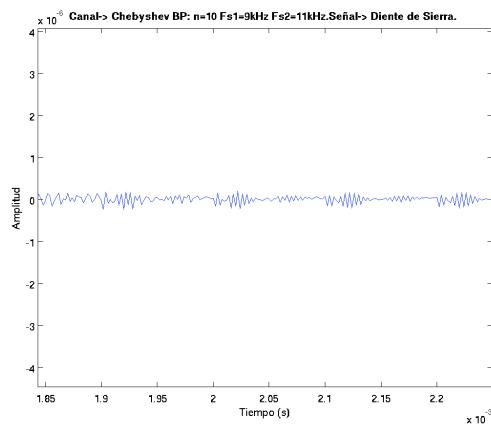
- Orden 2



- Orden 4

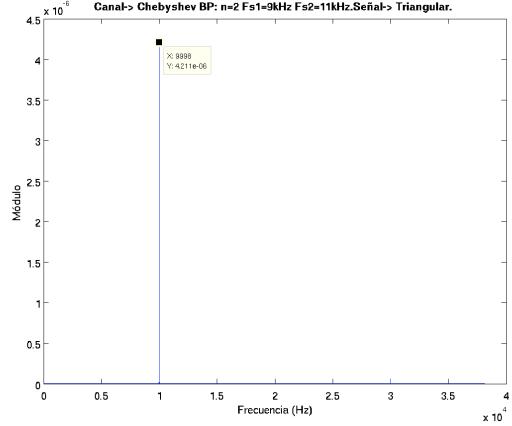
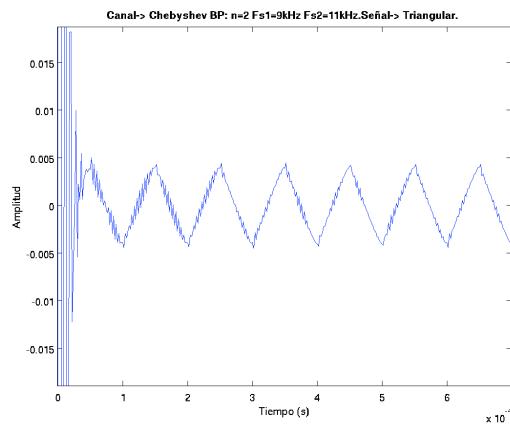


- Orden 10

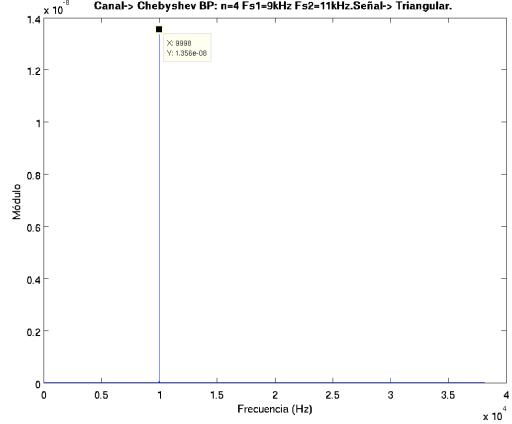
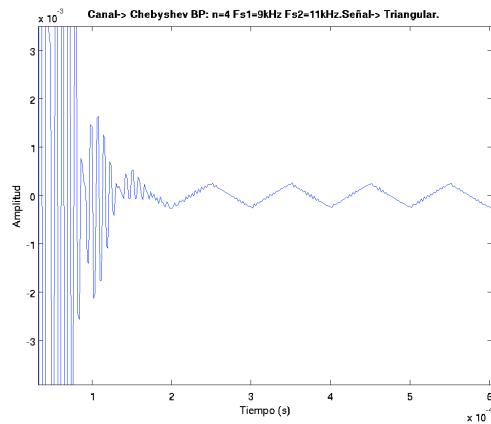


d. Triangular.

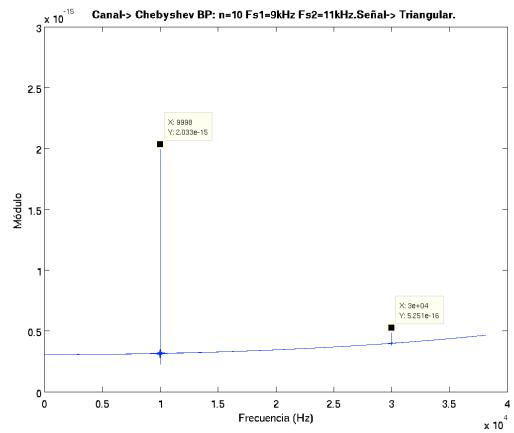
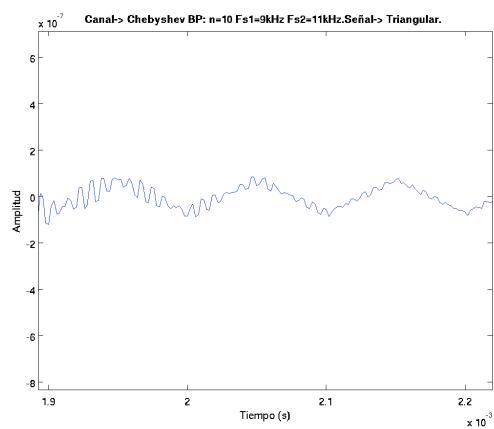
- Orden 2



- Orden 4

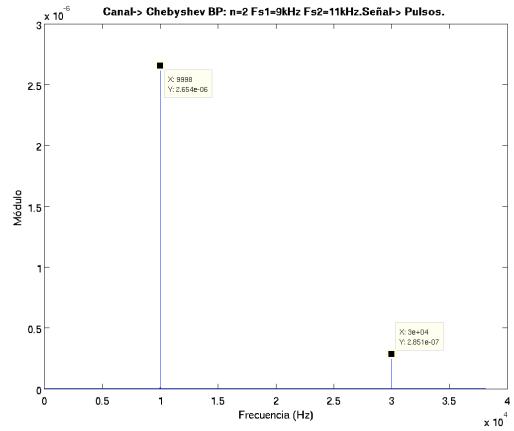
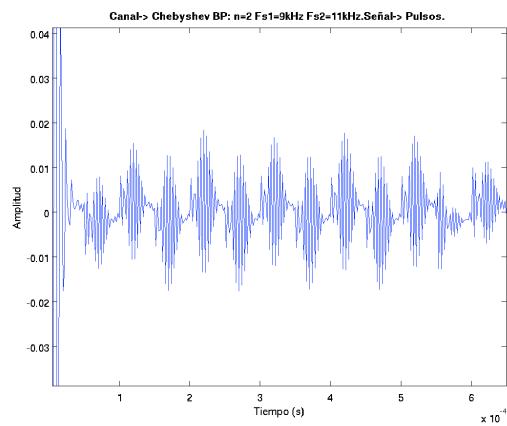


- Orden 10

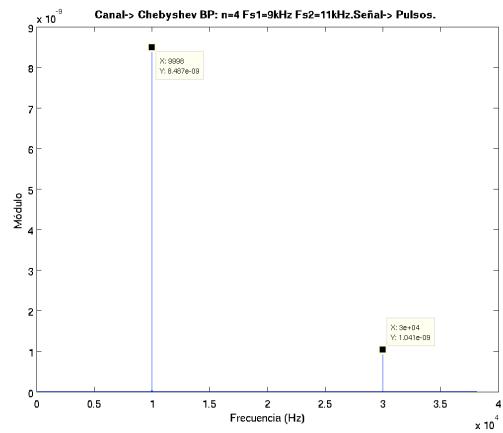
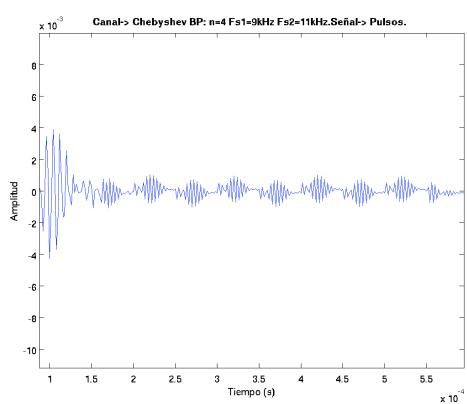


e. Pulsos.

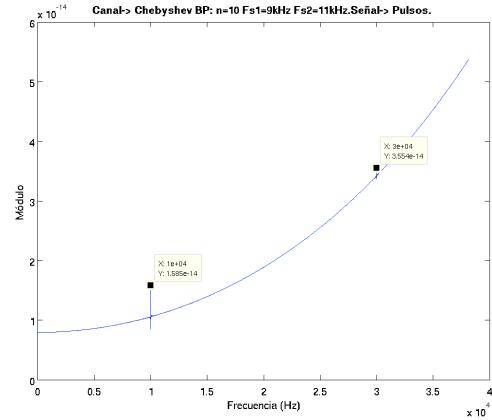
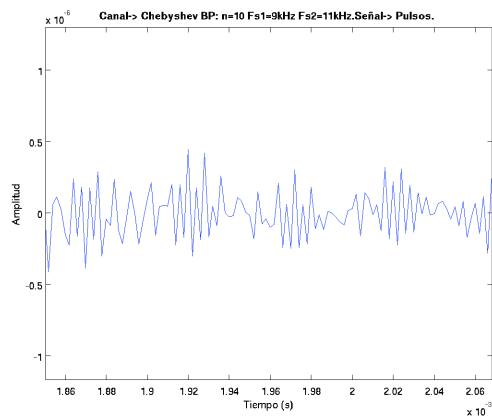
- Orden 2



- Orden 4

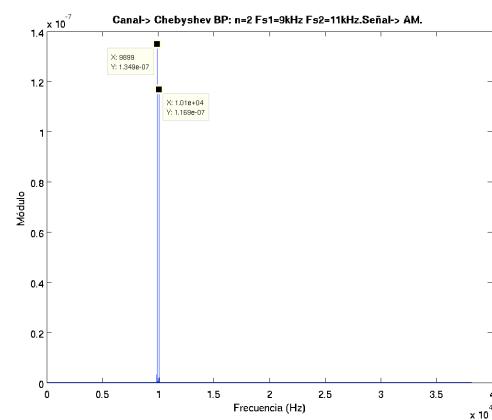
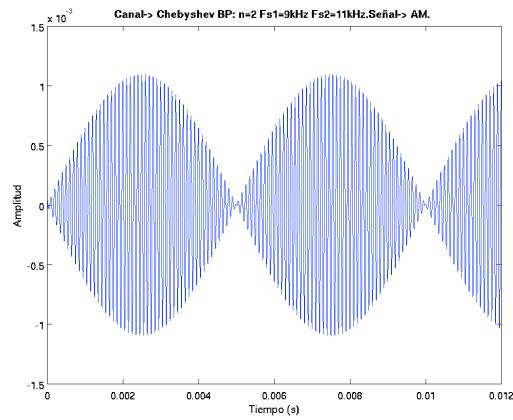


- Orden 10

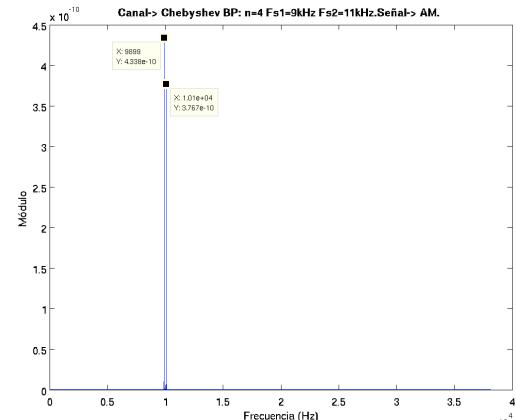
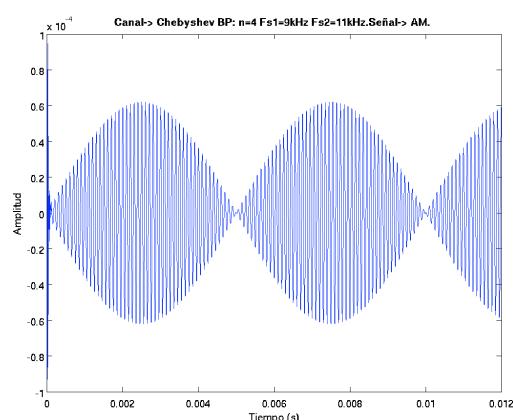


f. Señal modulada AM.

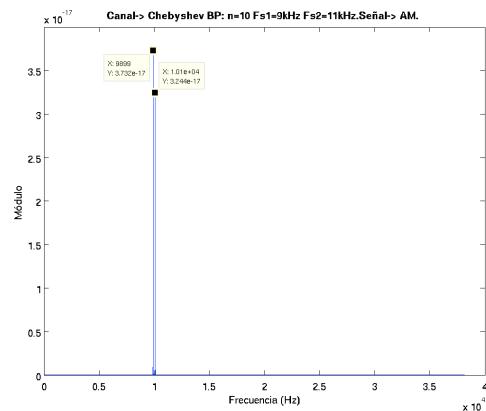
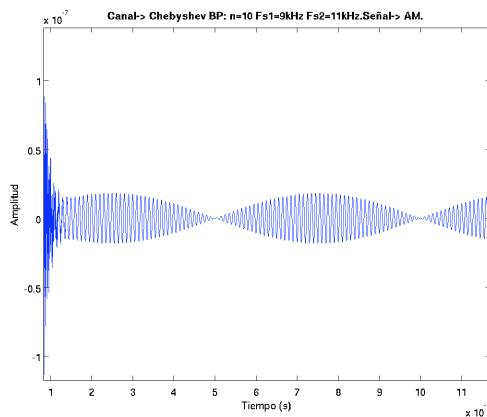
- Orden 2



- Orden 4

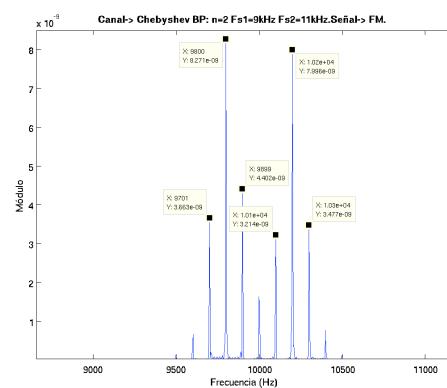
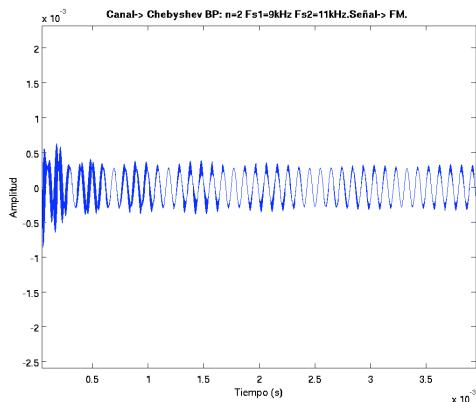


○ Orden 10

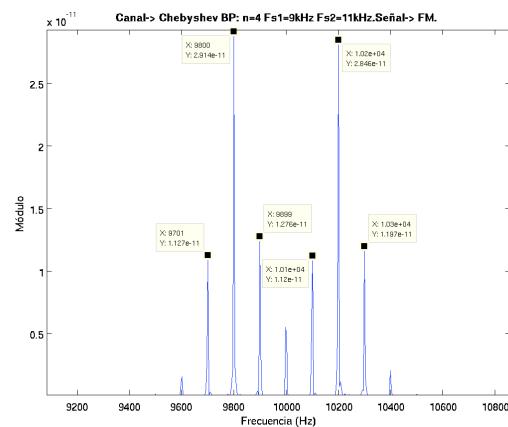
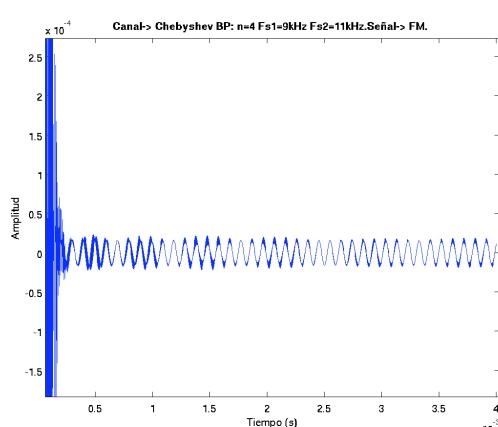


g. Señal modulada FM.

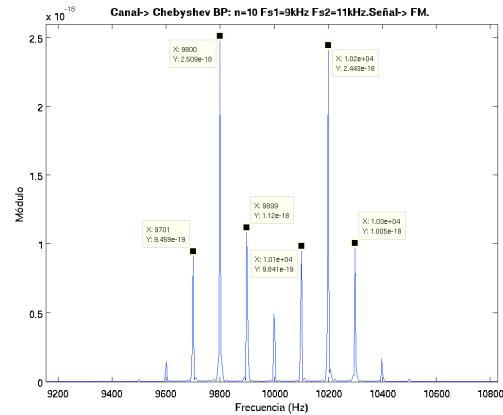
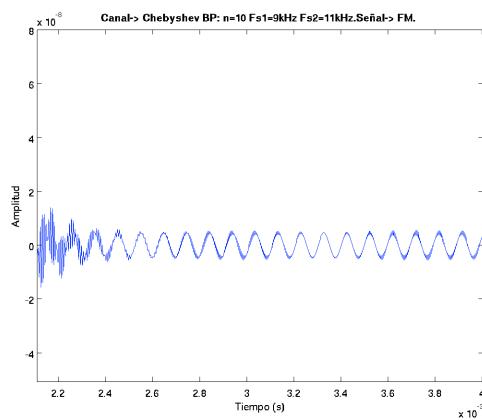
○ Orden 2



○ Orden 4



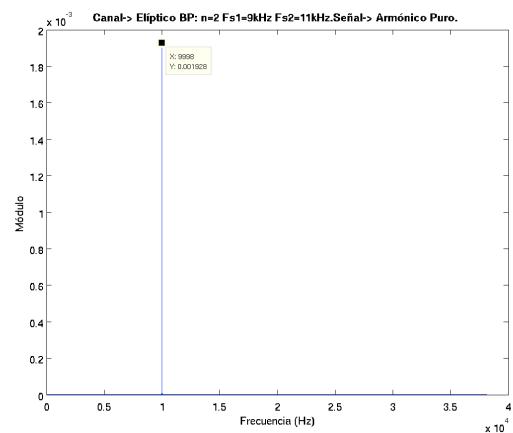
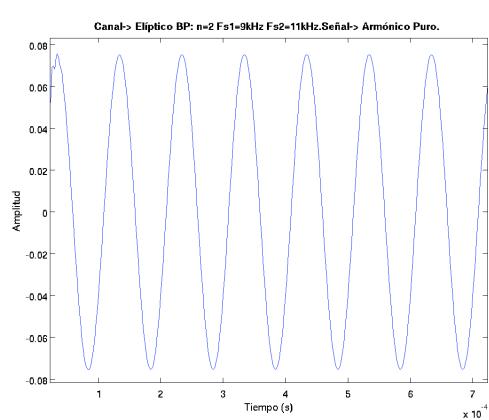
- *Orden 10*



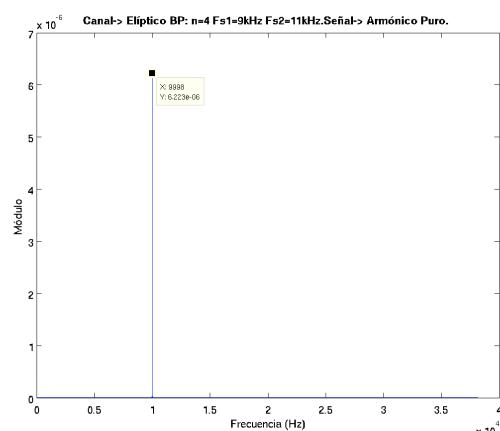
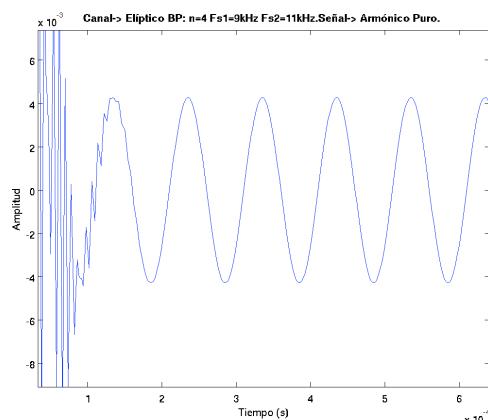
A.2.3. FILTRO TIPO ELÍPTICO.-

a. Armónico puro.

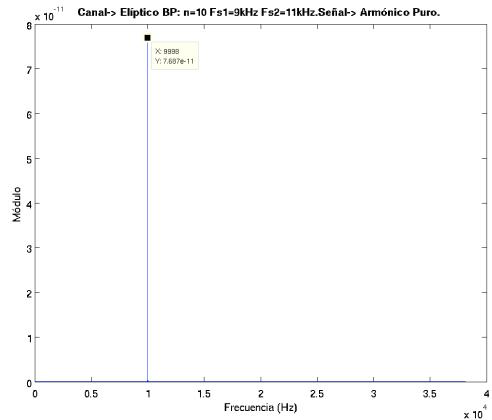
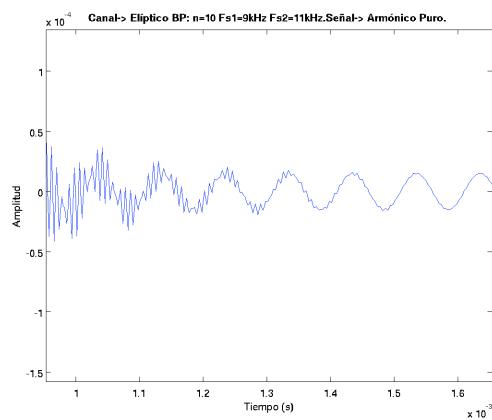
- *Orden 2*



- *Orden 4*

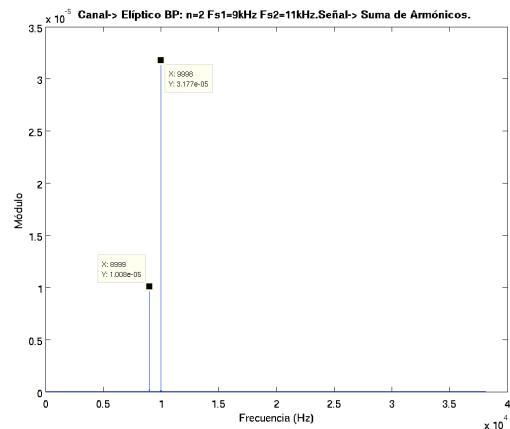
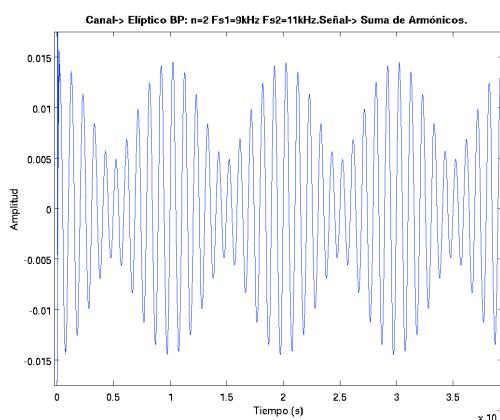


- Orden 10

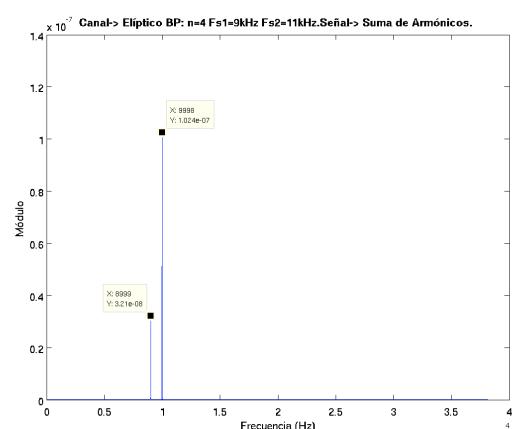
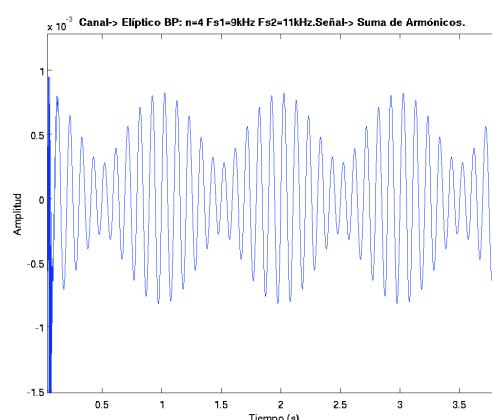


b. Suma de armónicos.

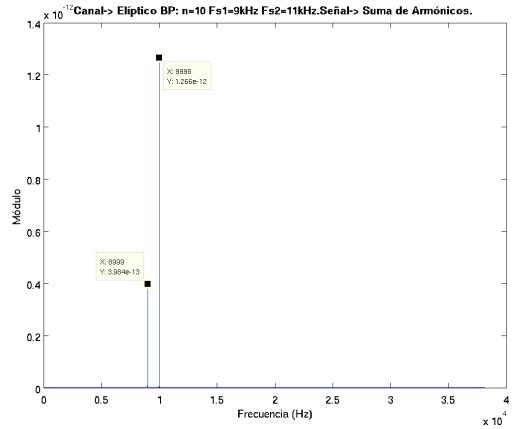
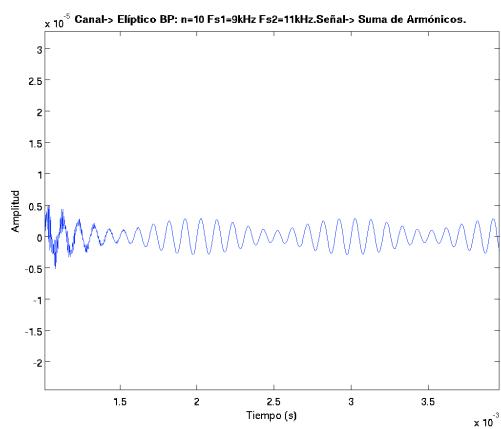
- Orden 2



- Orden 4

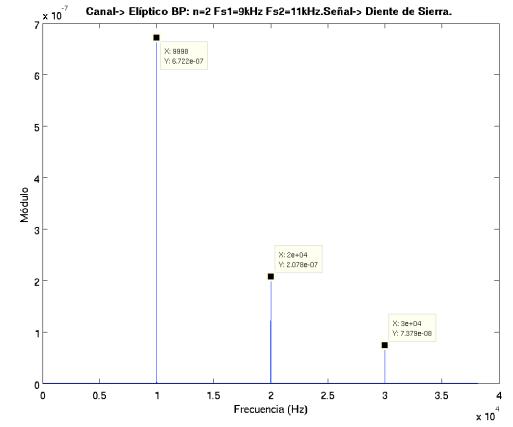
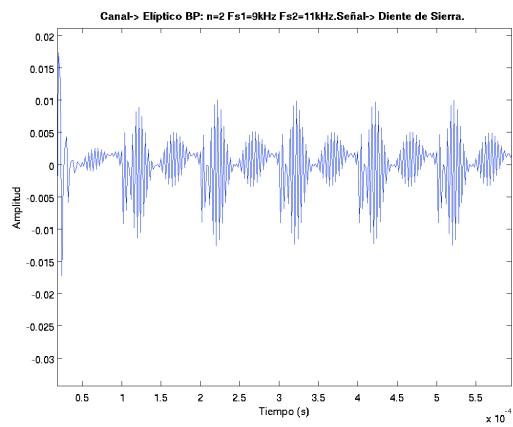


○ Orden 10

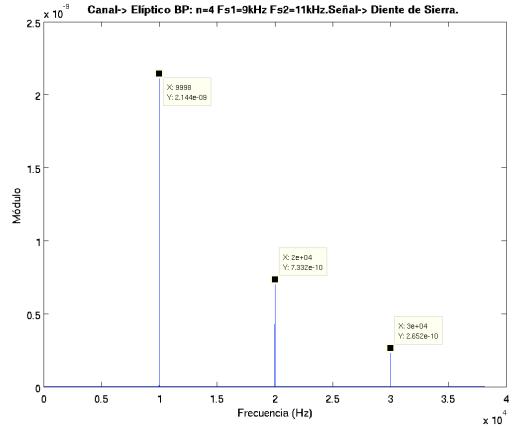
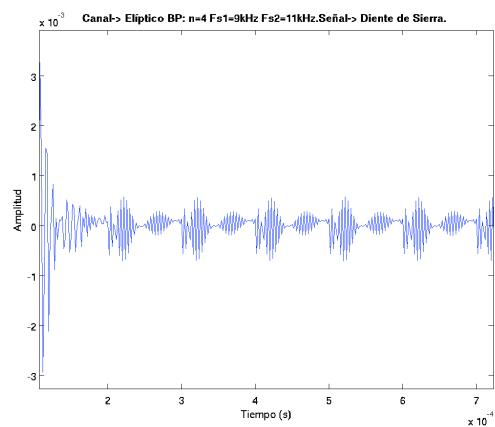


C. Diente de sierra.

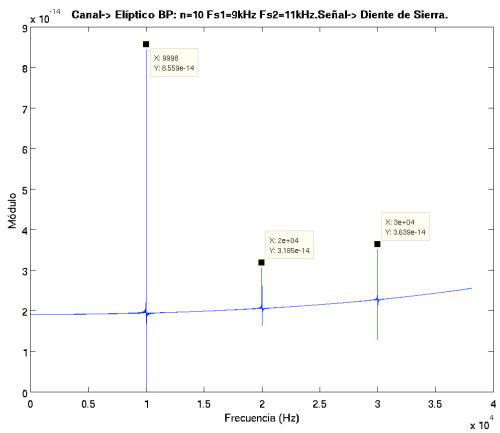
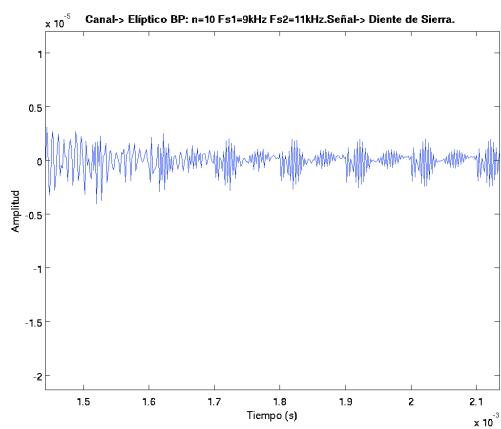
○ Orden 2



○ Orden 4

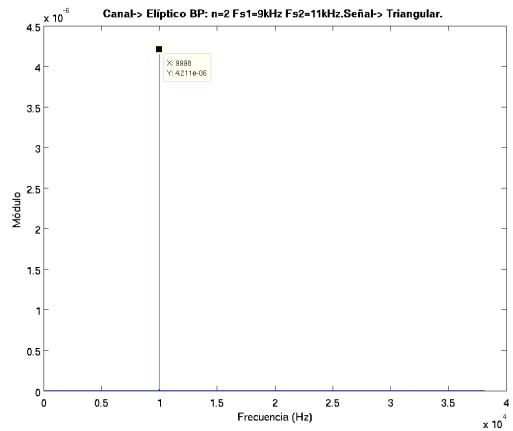
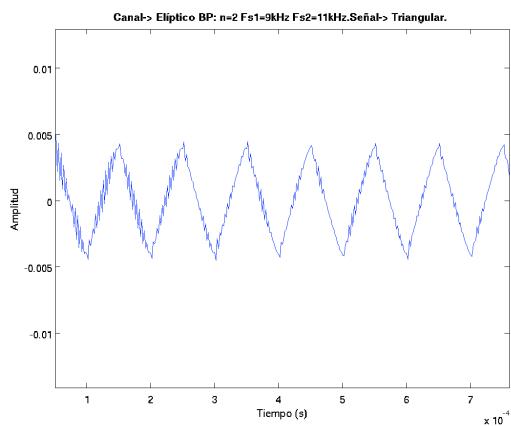


- Orden 10

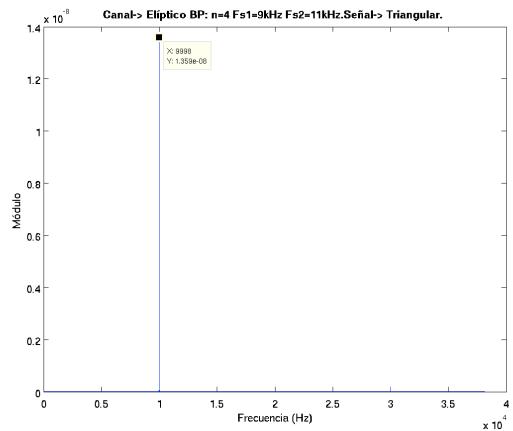
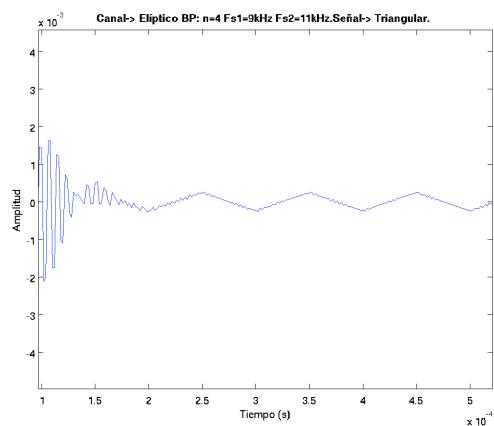


d. Triangular.

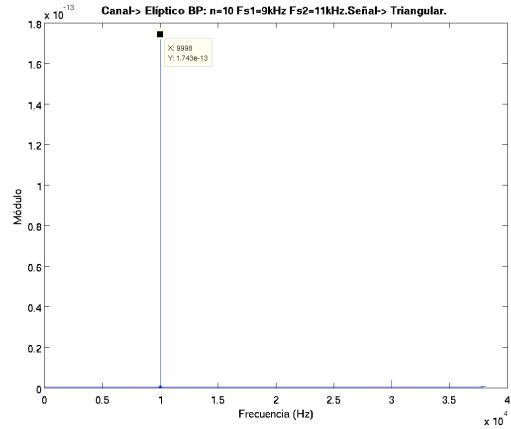
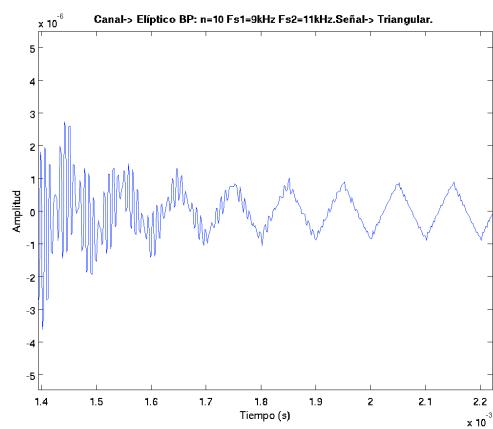
- Orden 2



- Orden 4

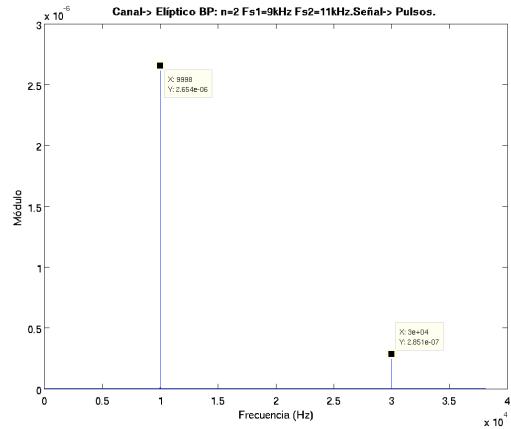
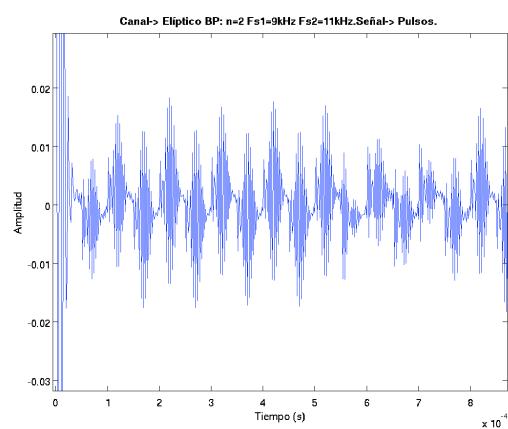


○ Orden 10

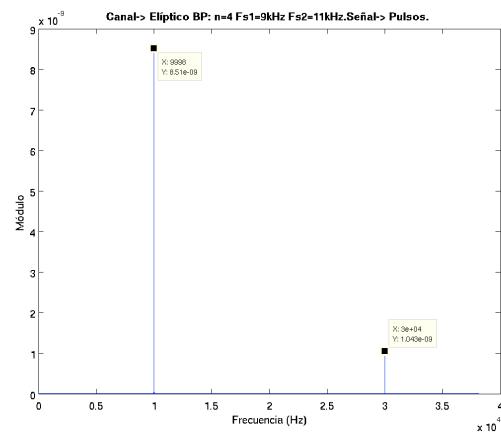
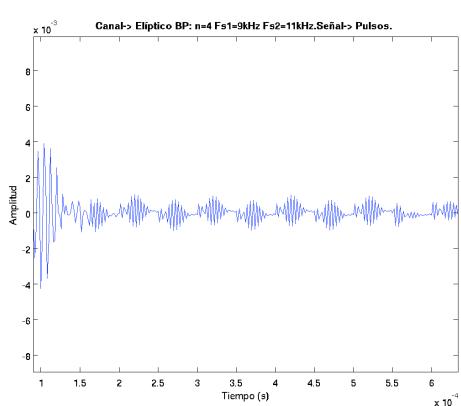


e. Pulsos.

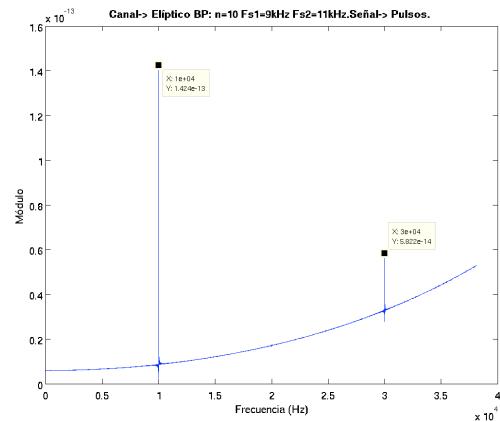
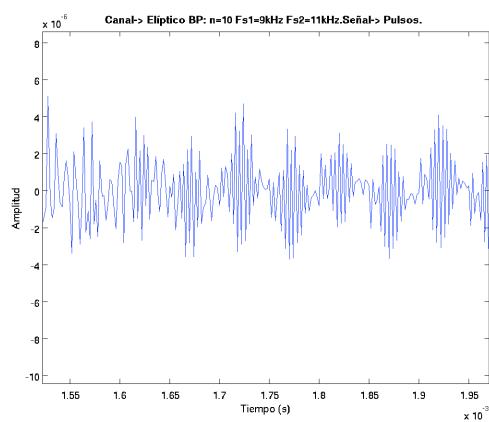
○ Orden 2



○ Orden 4

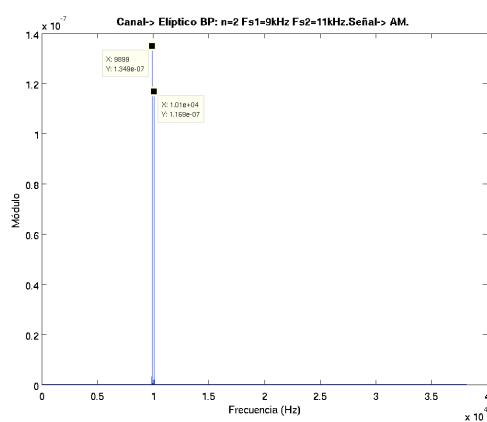
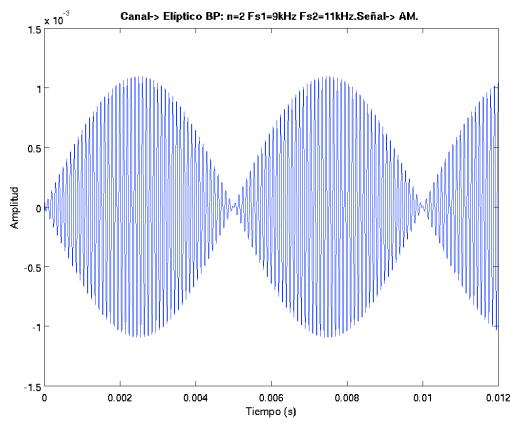


○ Orden 10

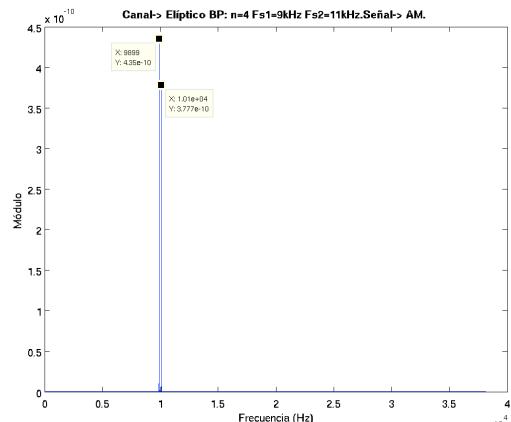
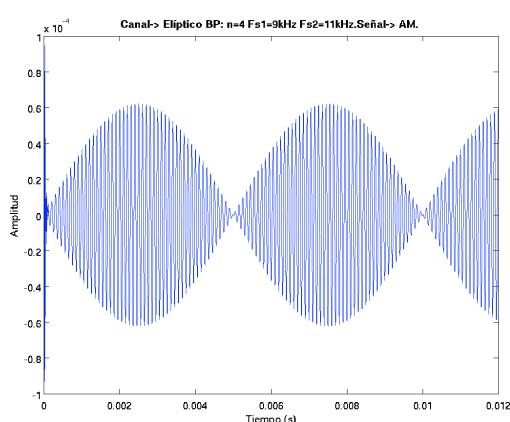


f. Señal modulada AM.

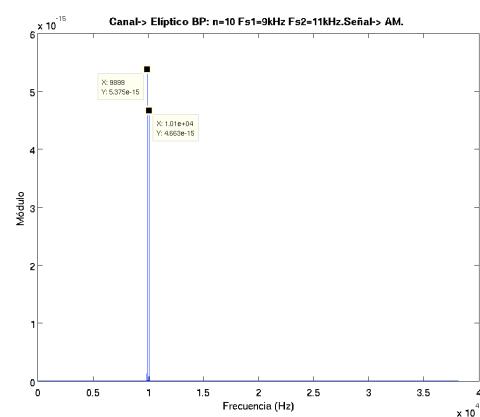
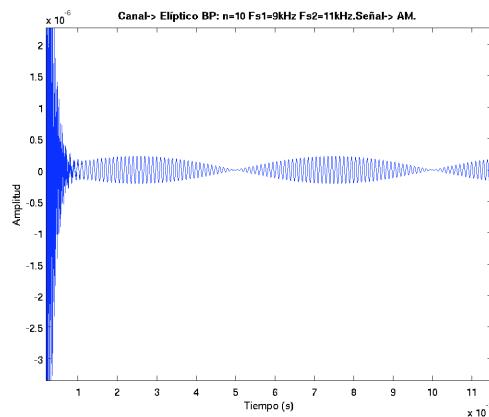
○ Orden 2



○ Orden 4

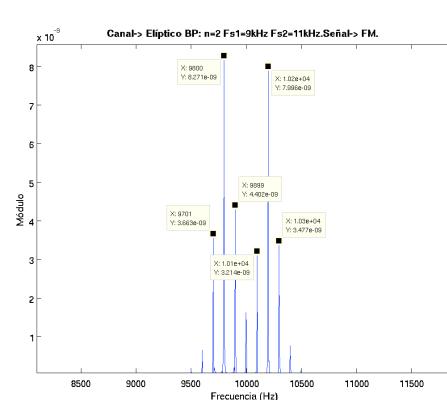
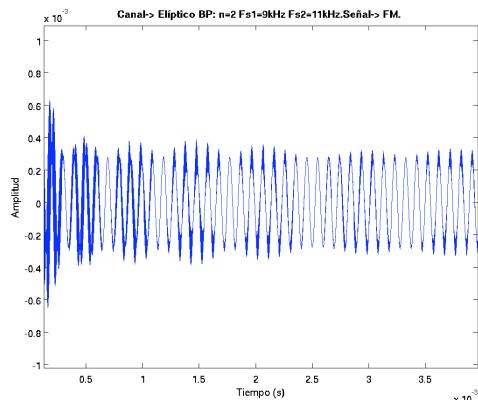


- Orden 10

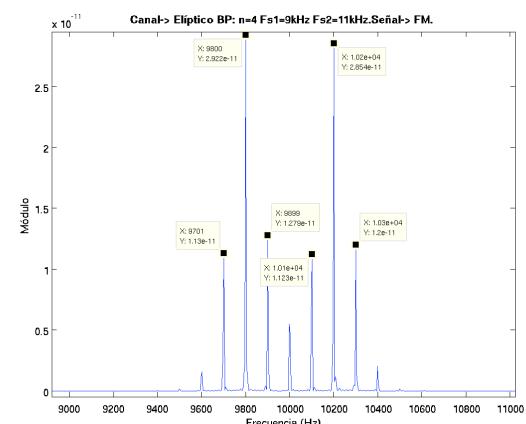
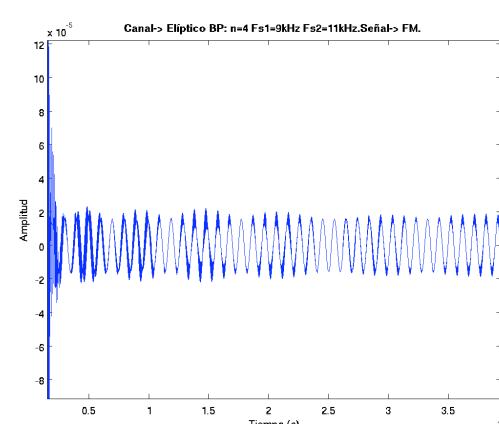


g. Señal modulada FM.

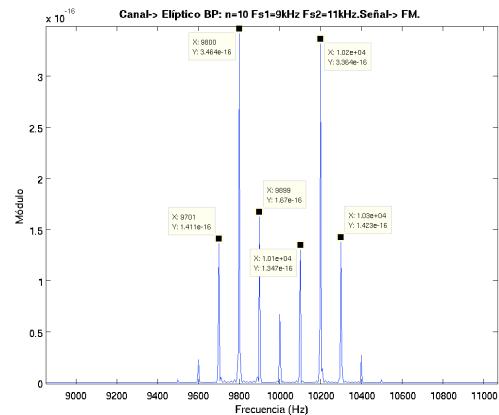
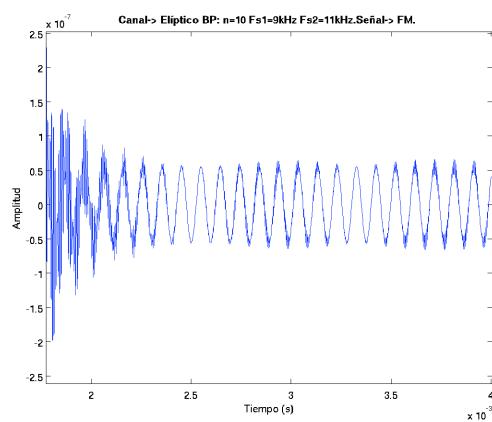
- Orden 2



- Orden 4



- *Orden 10*

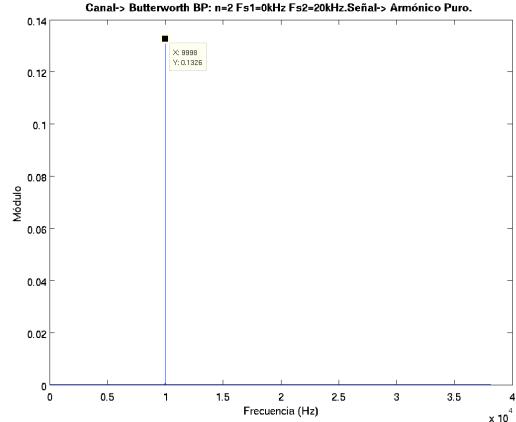
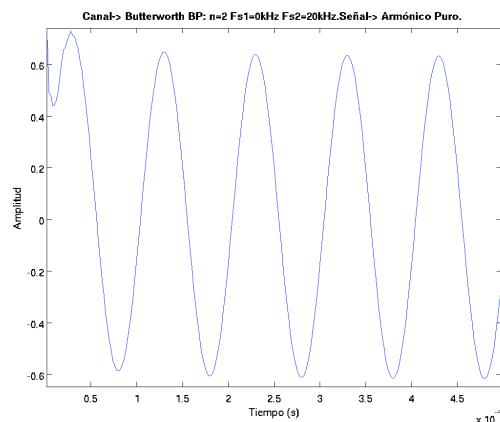


A.3. CANAL ANCHO (BP: 2 HZ – 20 KHZ)

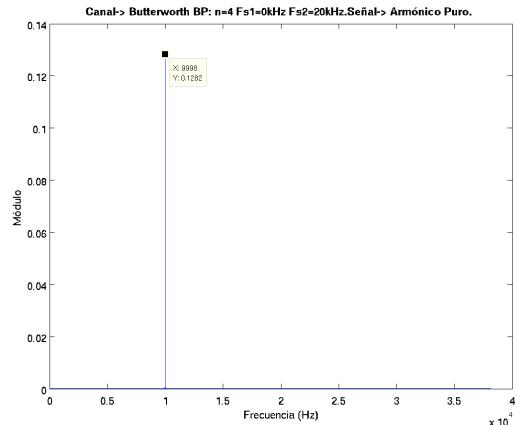
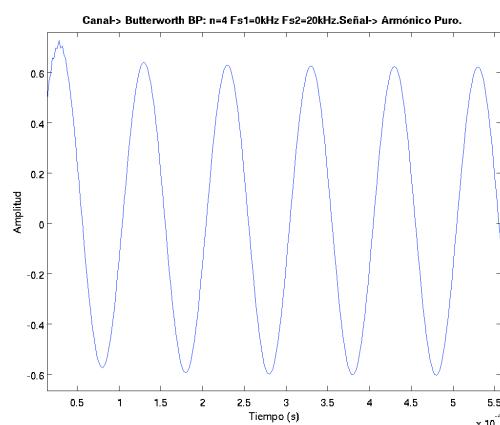
A.3.1. FILTRO TIPO BUTTERWORTH

a. Armónico puro.

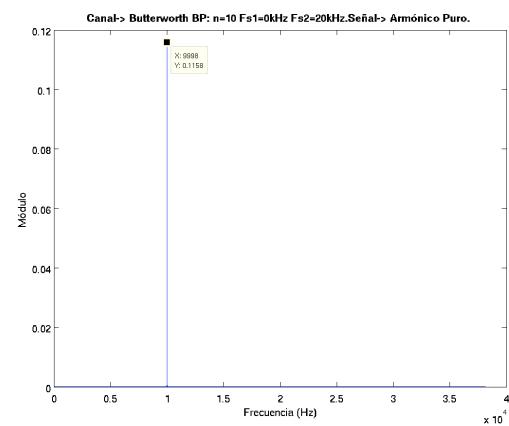
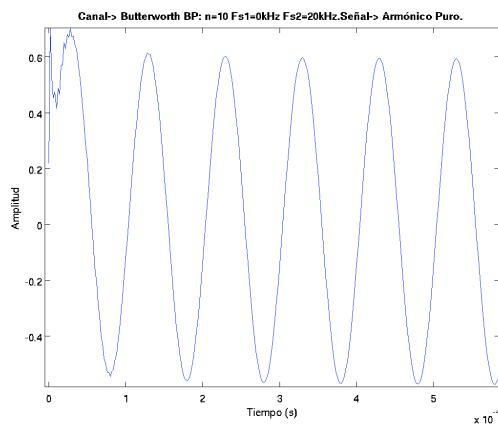
- *Orden 2*



- *Orden 4*

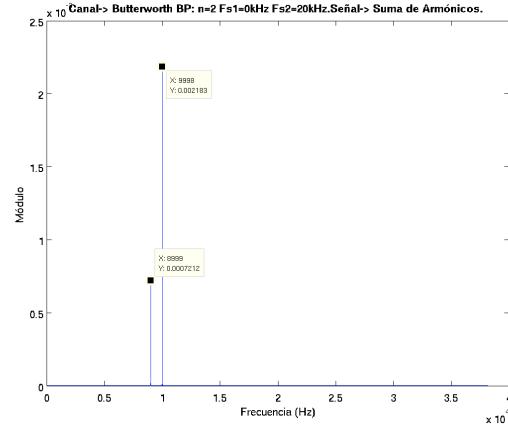
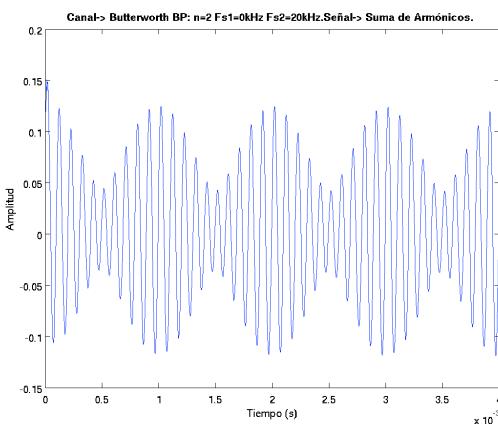


- Orden 10

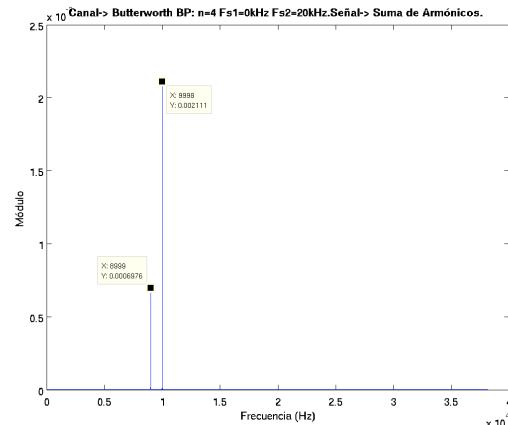
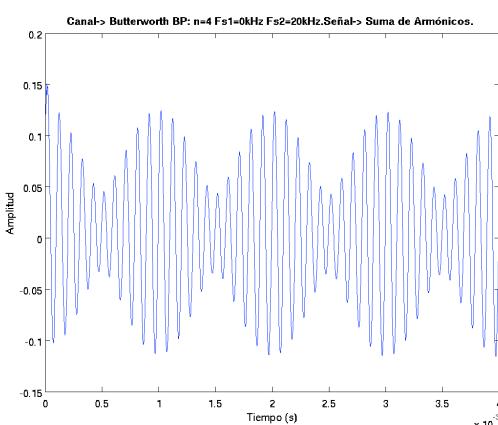


b. Suma de armónicos.

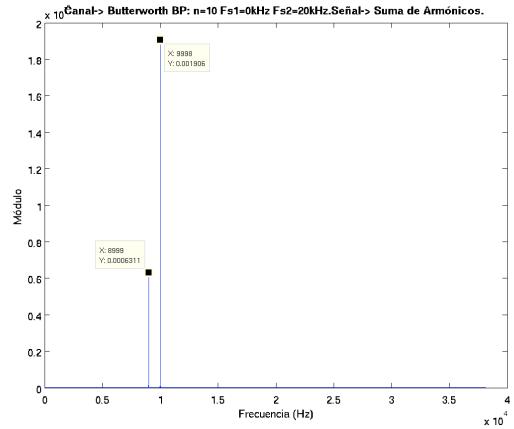
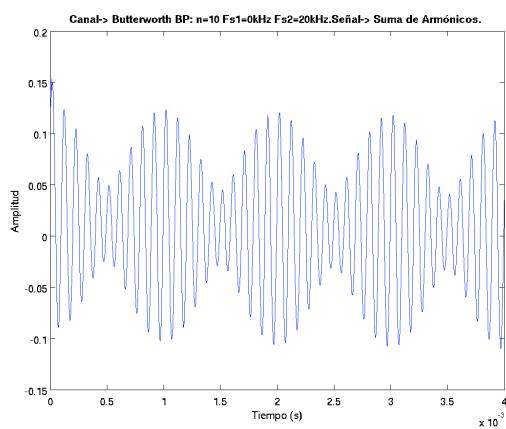
- Orden 2



- Orden 4

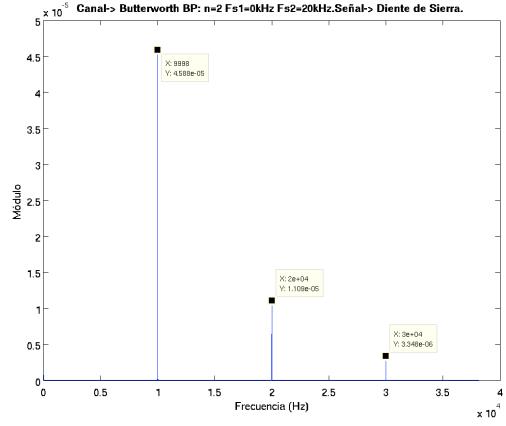
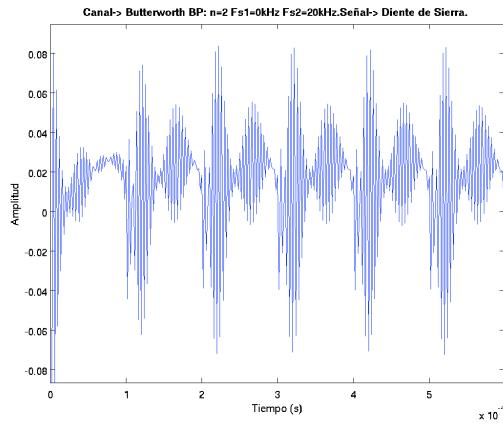


- Orden 10

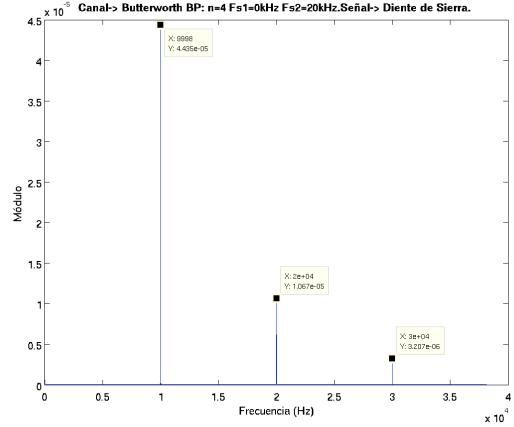
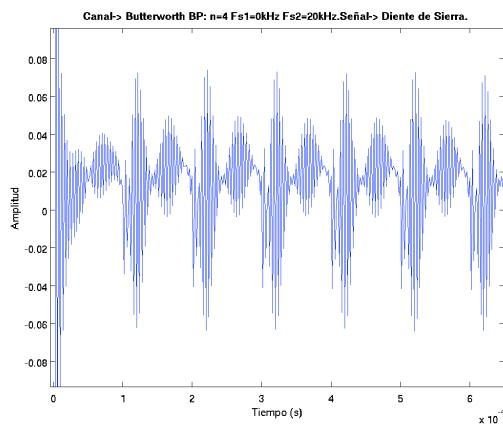


C. Diente de sierra.

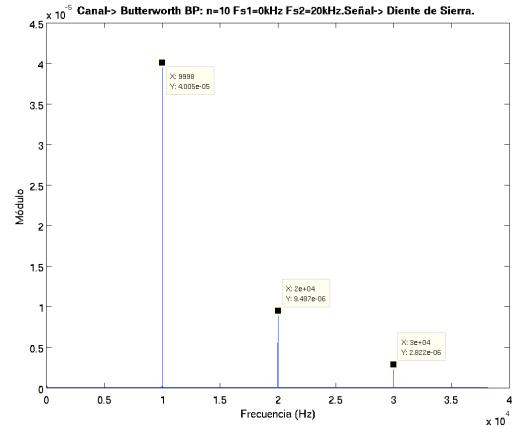
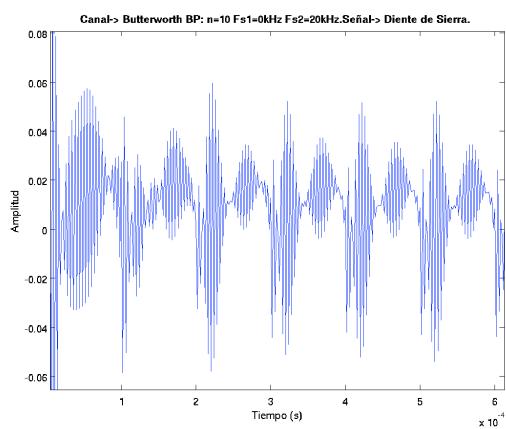
- Orden 2



- Orden 4

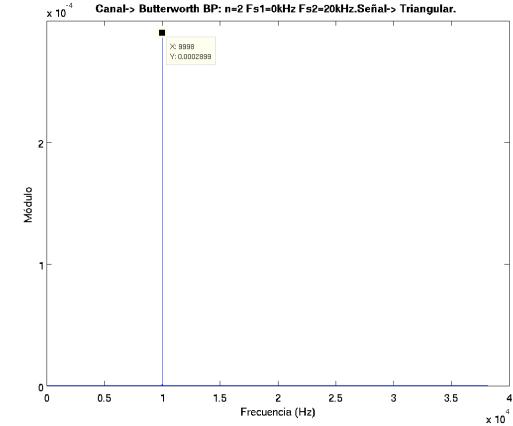
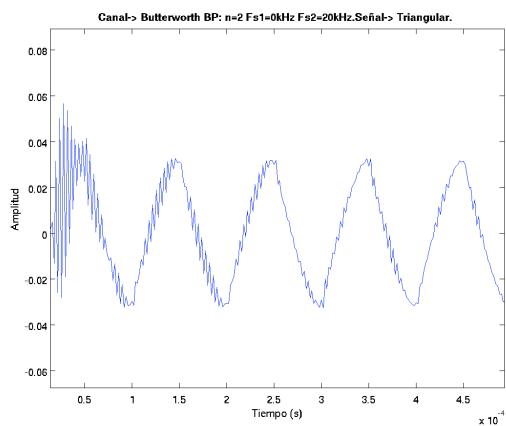


- Orden 10

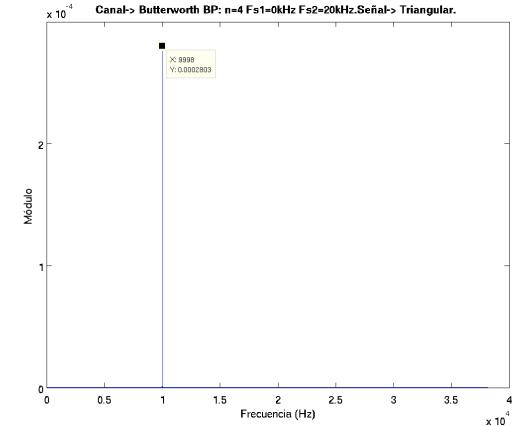
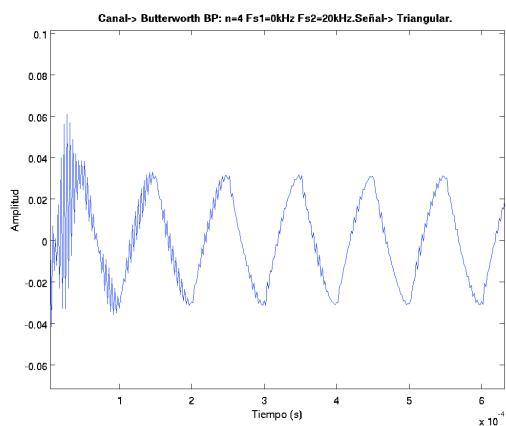


d. Triangular.

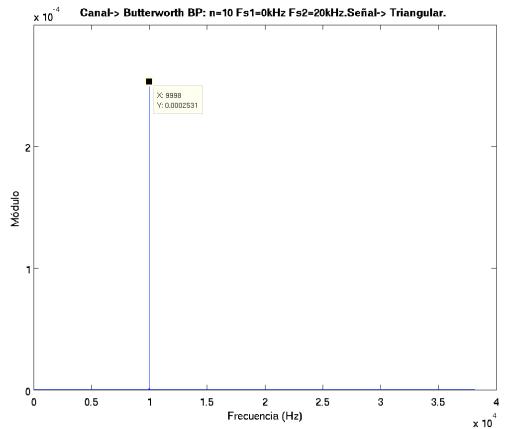
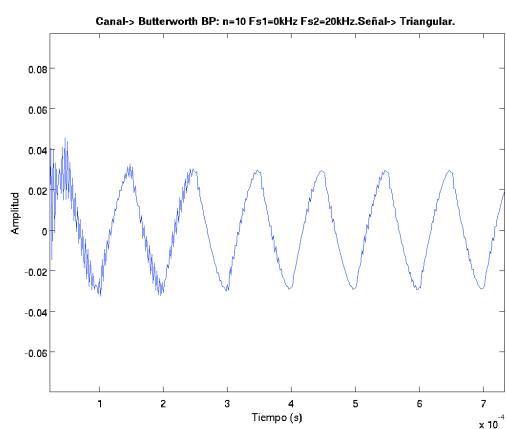
- Orden 2



- Orden 4

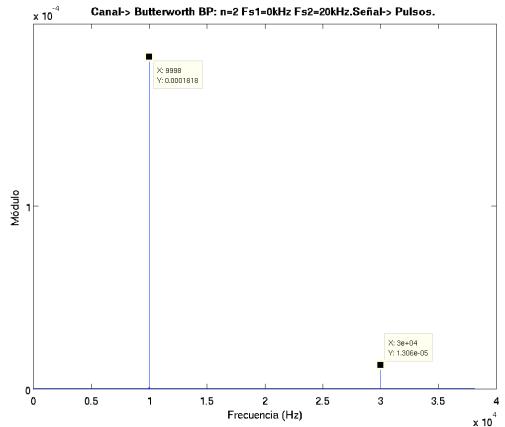
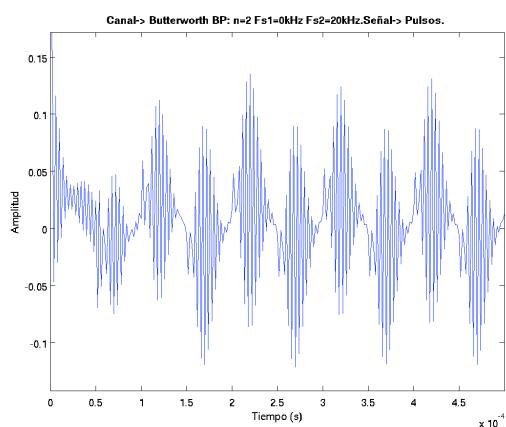


- Orden 10

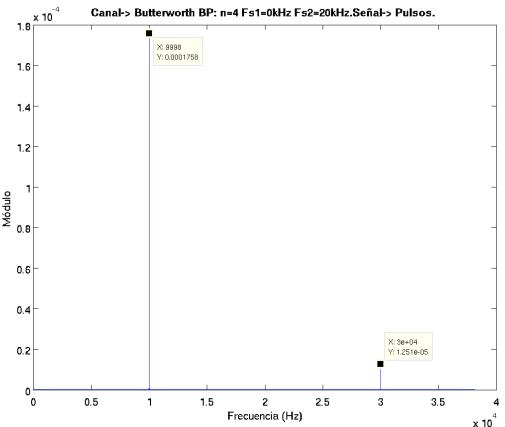
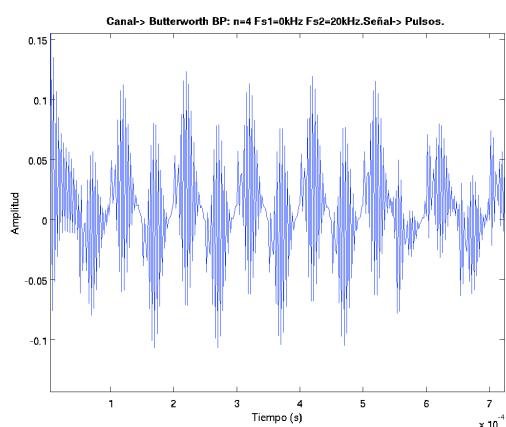


e. Pulsos.

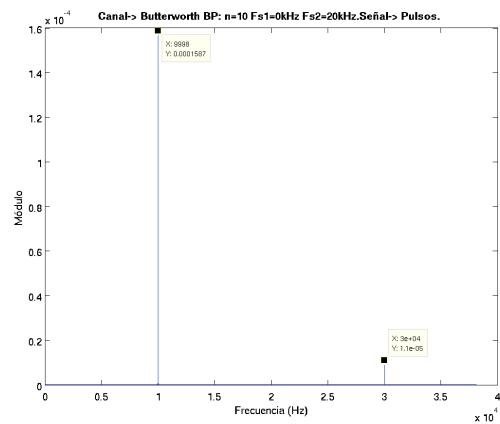
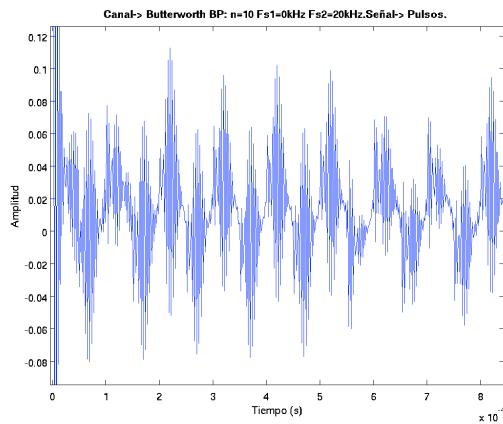
- Orden 2



- Orden 4

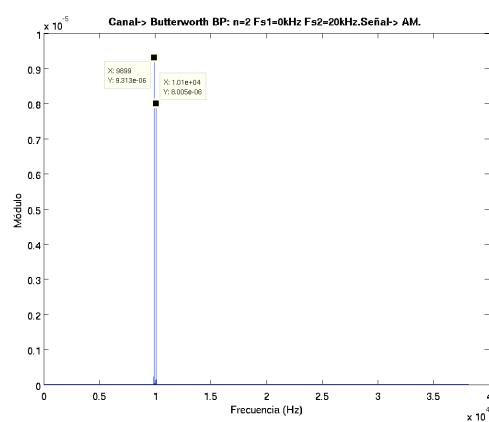
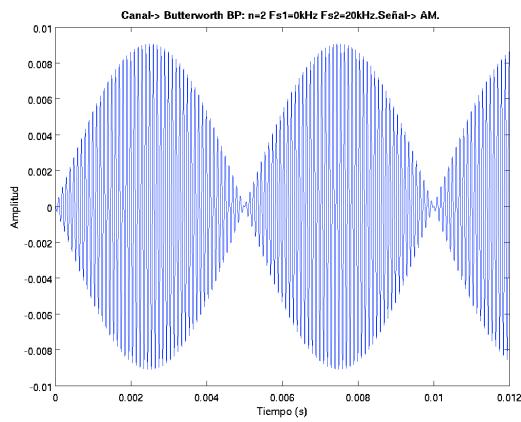


- Orden 10

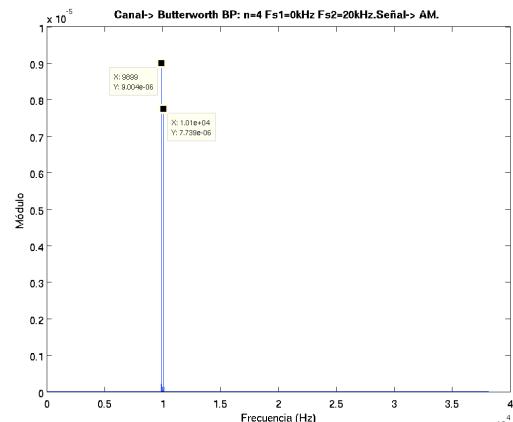
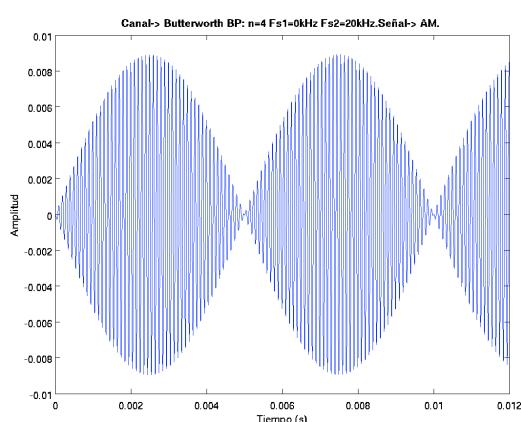


f. Señal modulada AM.

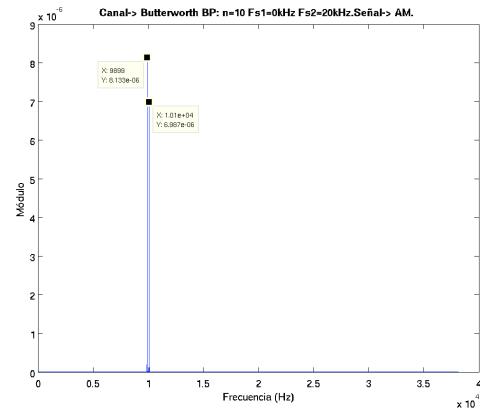
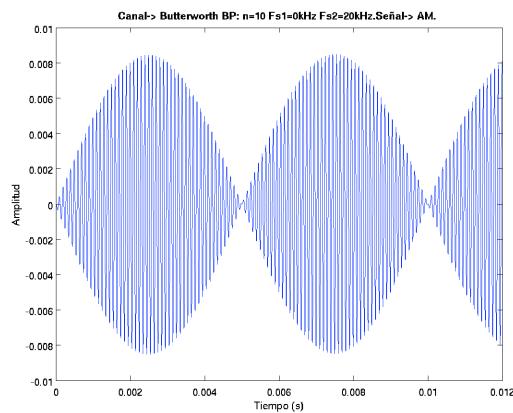
- Orden 2



- Orden 4

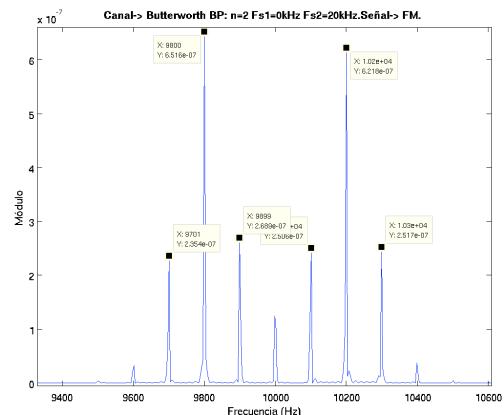
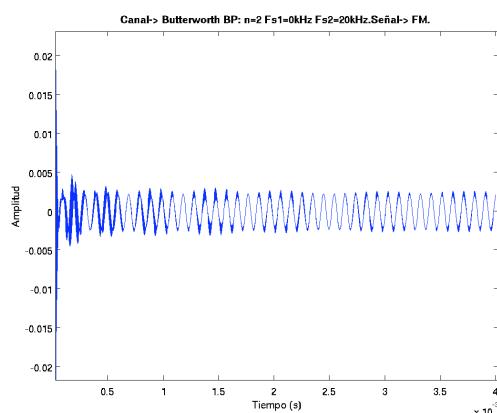


- Orden 10

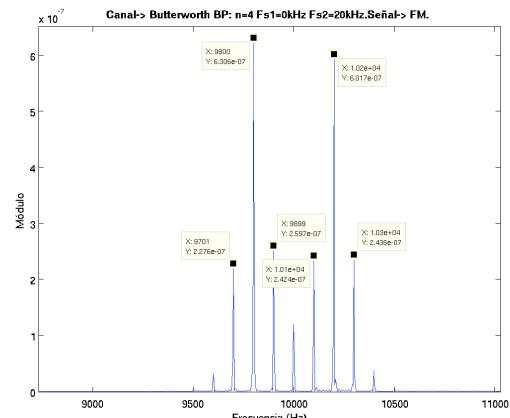
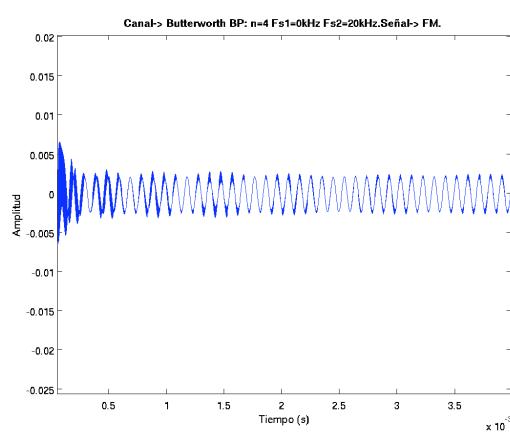


g. Señal modulada FM.

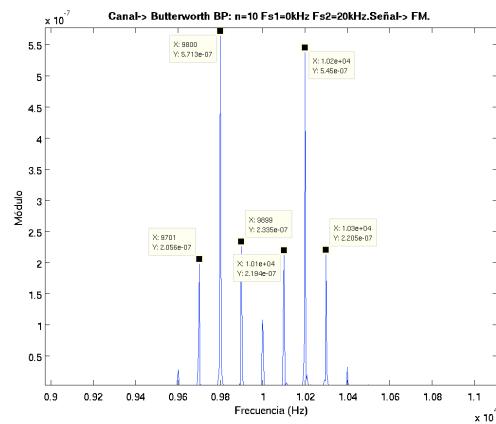
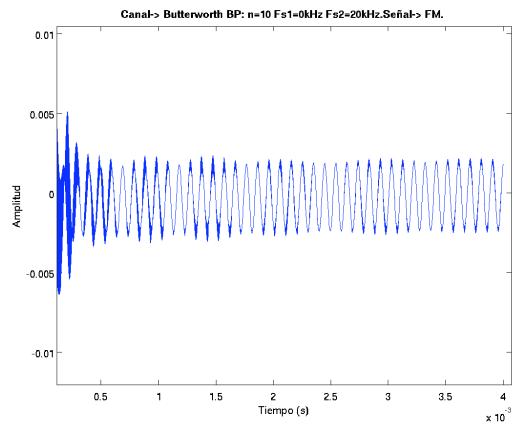
- Orden 2



- Orden 4



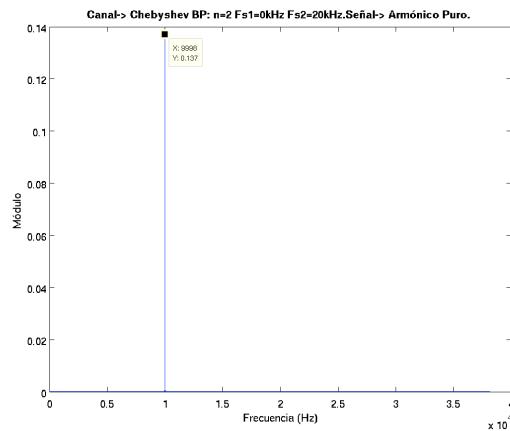
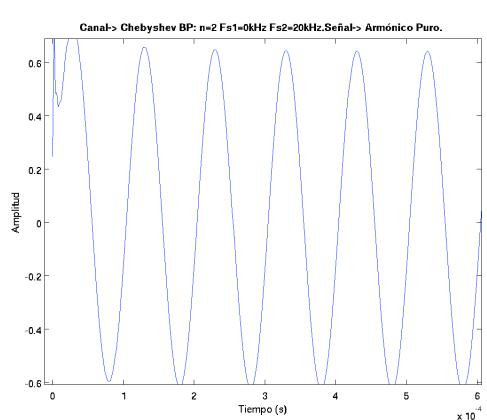
- Orden 10



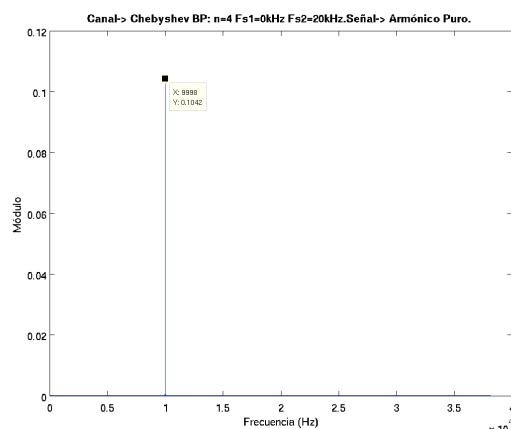
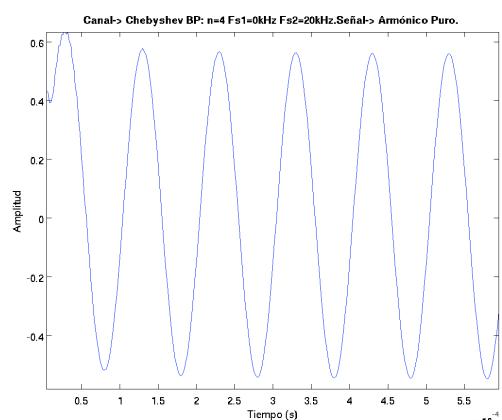
A.3.2. FILTRO TIPO CHEBYSHEV

a. Armónico puro.

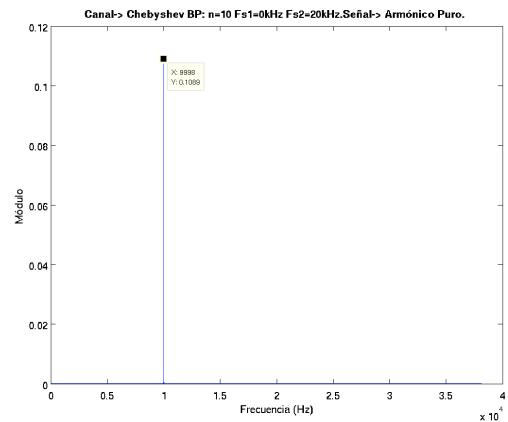
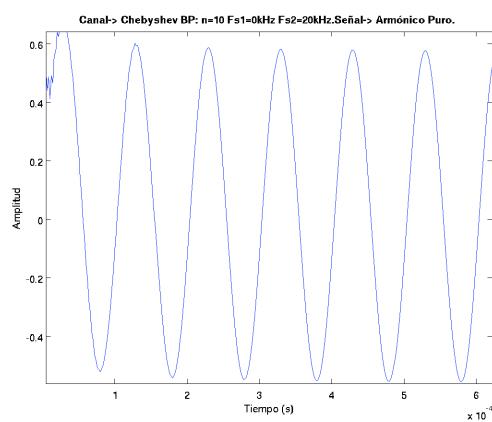
- Orden 2



- Orden 4

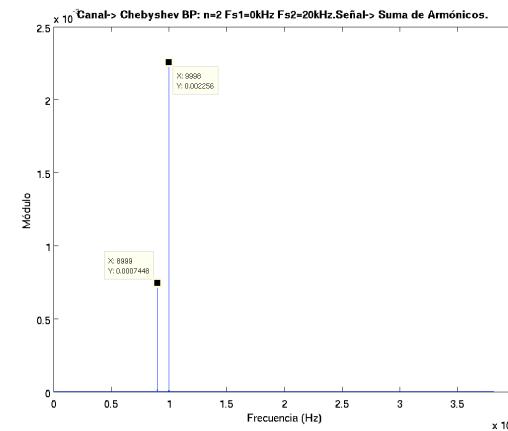
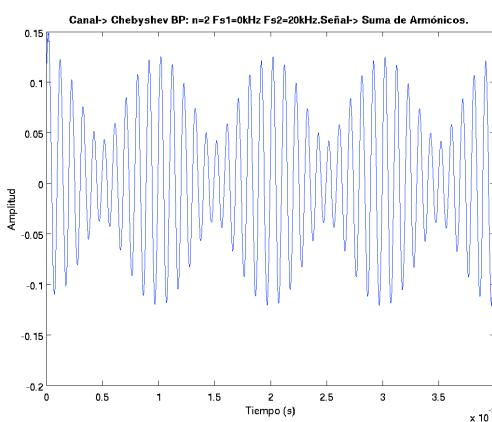


○ Orden 10

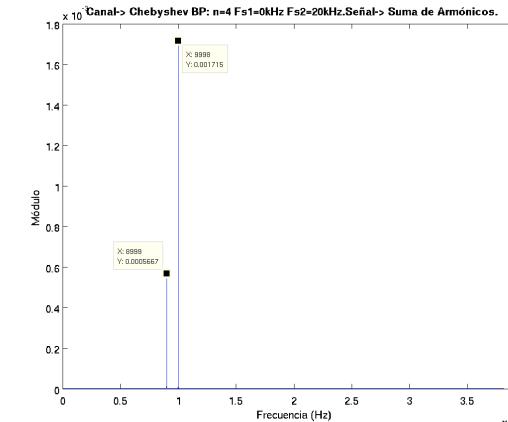
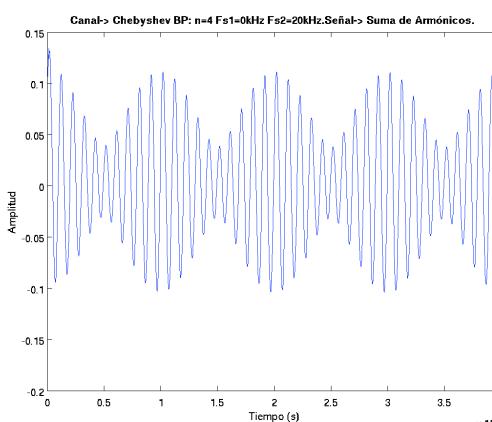


b. Suma de armónicos.

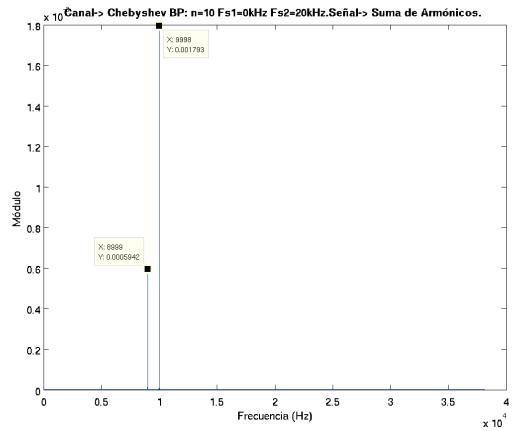
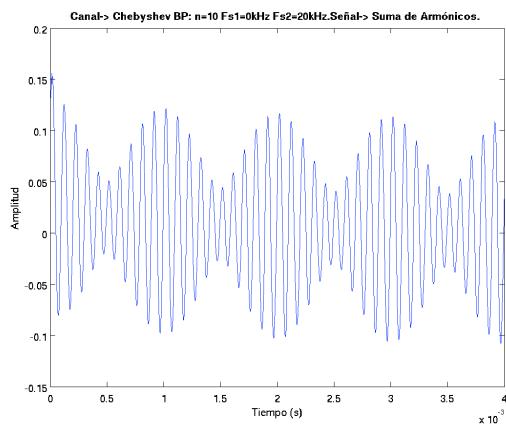
○ Orden 2



○ Orden 4

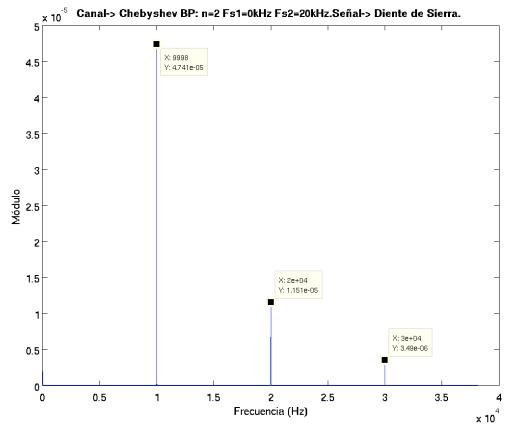
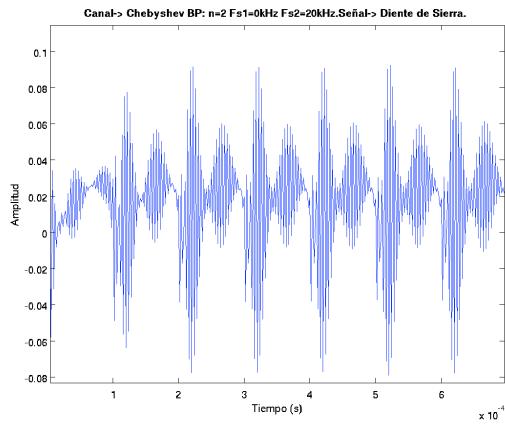


- Orden 10

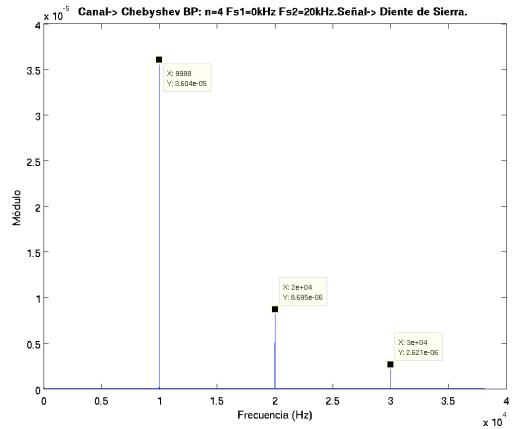
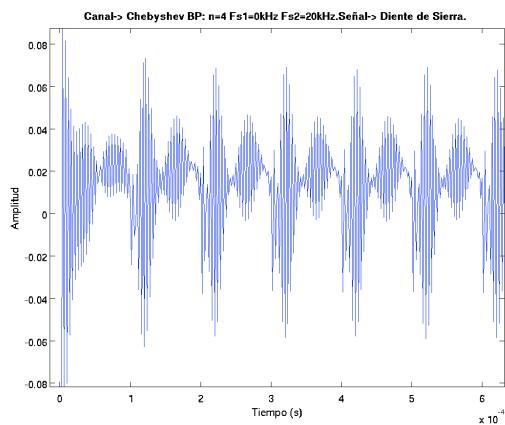


C. Diente de sierra.

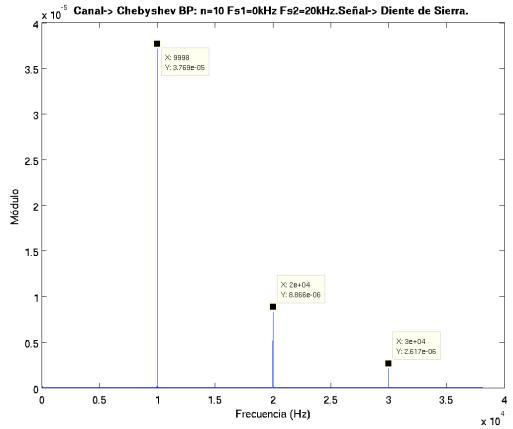
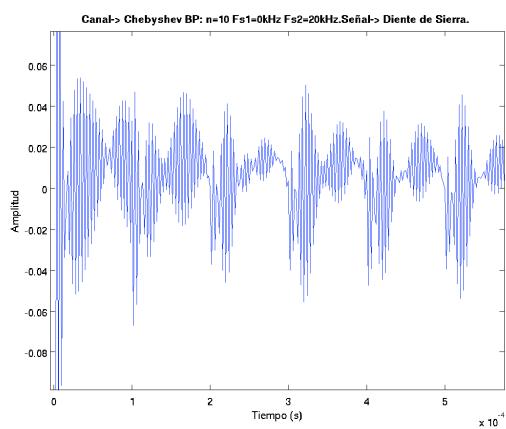
- Orden 2



- Orden 4

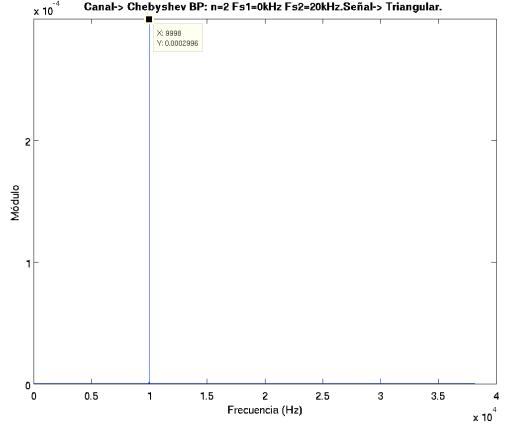
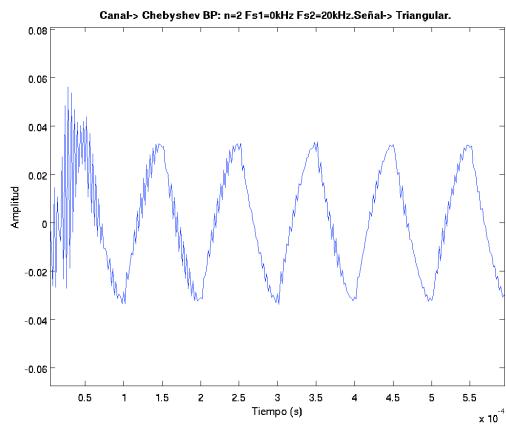


- Orden 10

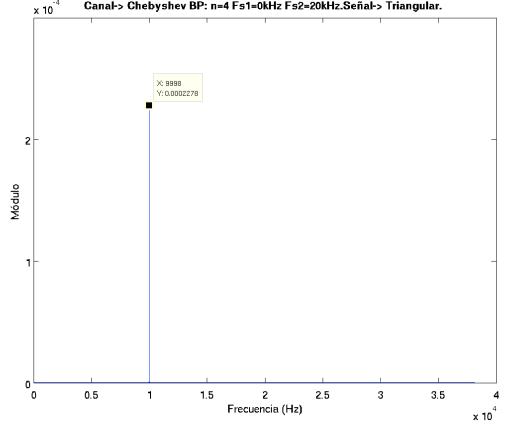
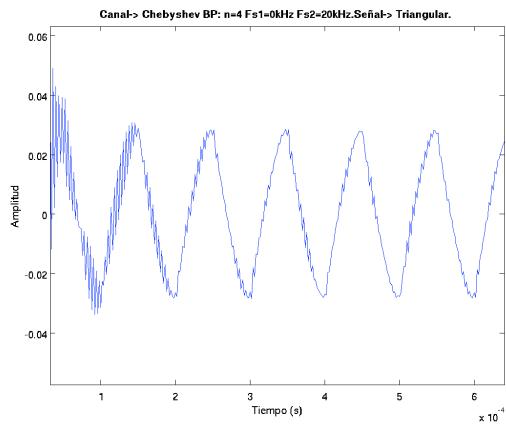


d. Triangular.

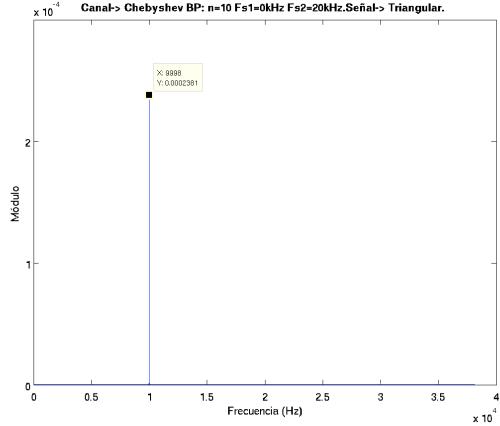
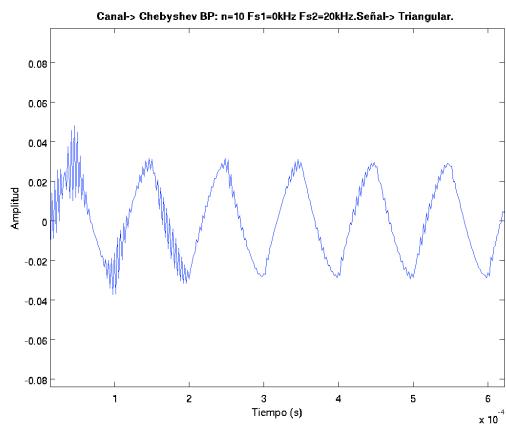
- Orden 2



- Orden 4

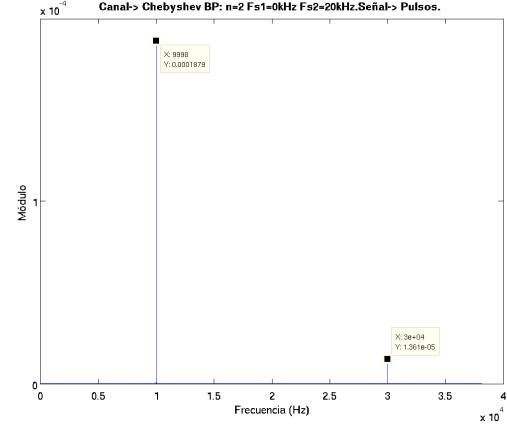
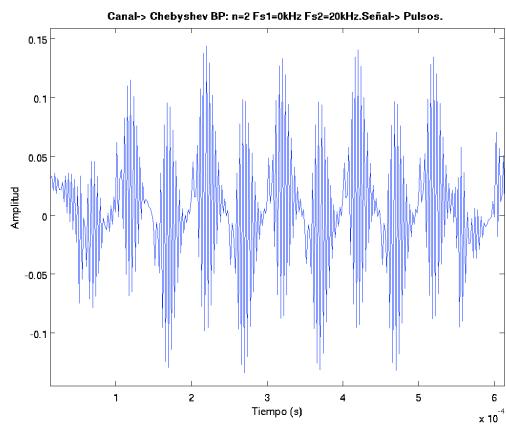


- Orden 10

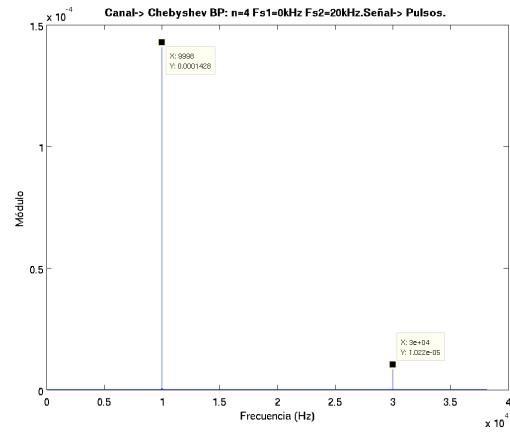
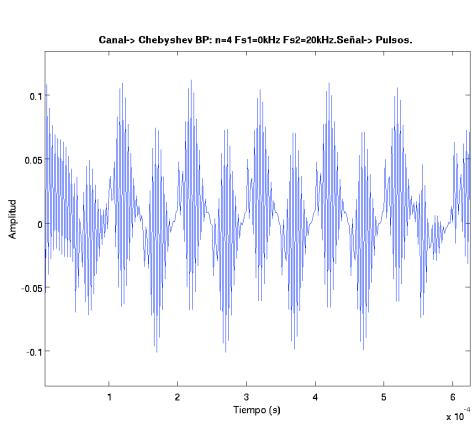


e. Pulsos.

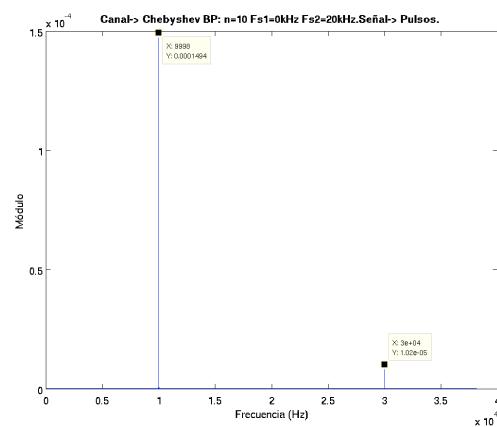
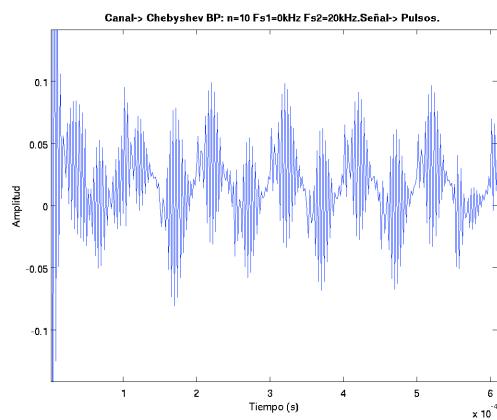
- Orden 2



- Orden 4

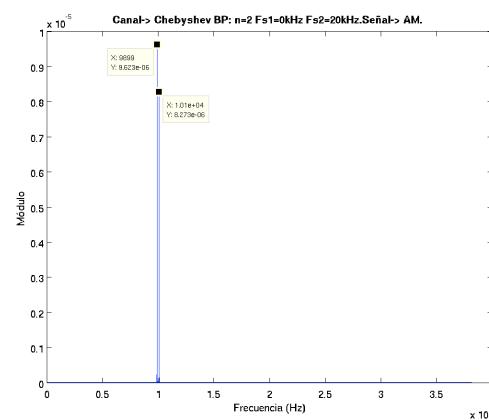
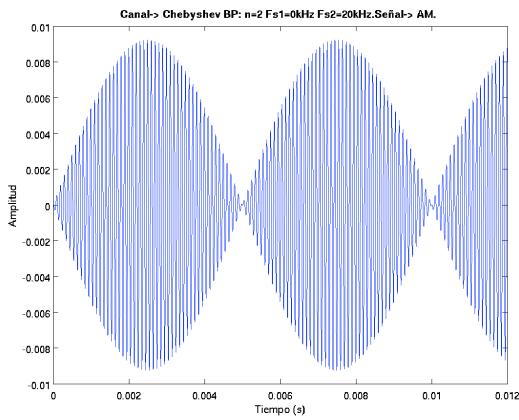


- Orden 10

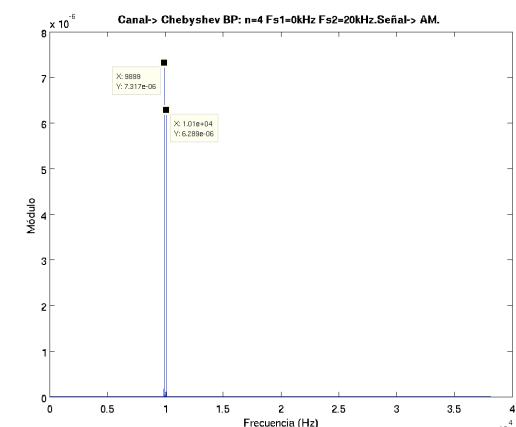
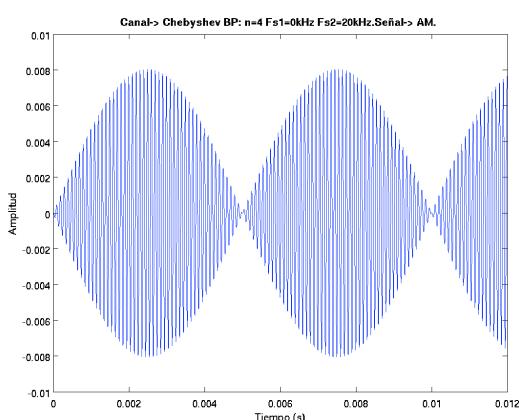


f. Señal modulada AM.

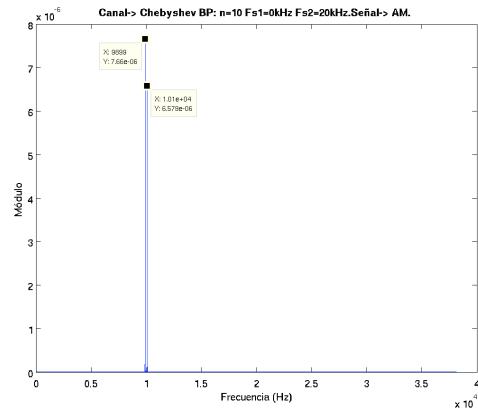
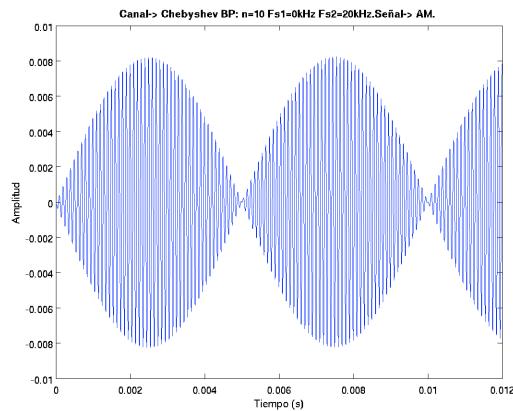
- Orden 2



- Orden 4

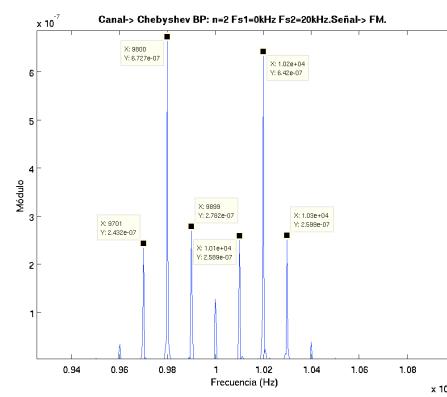
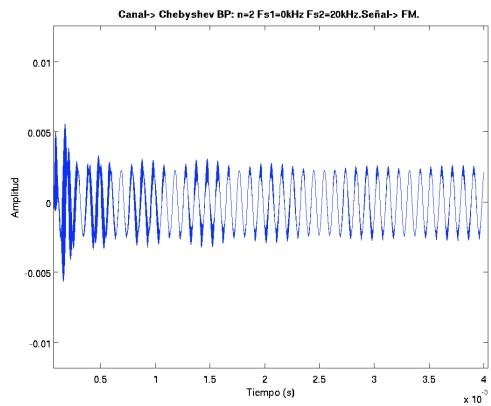


- Orden 10

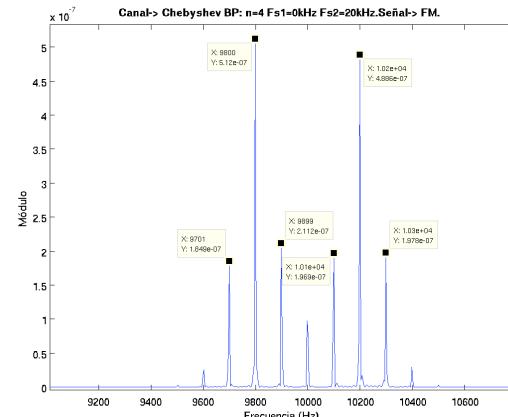
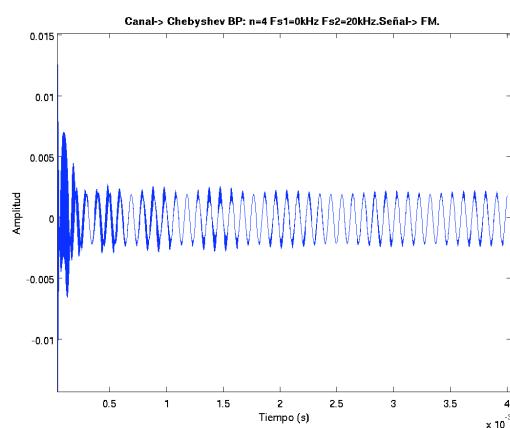


g. Señal modulada FM.

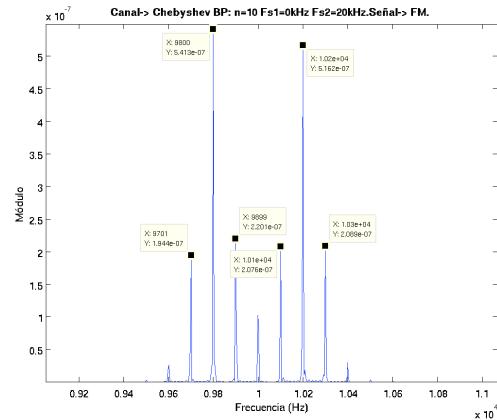
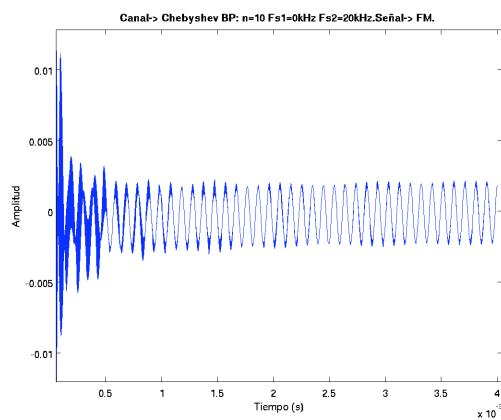
- Orden 2



- Orden 4



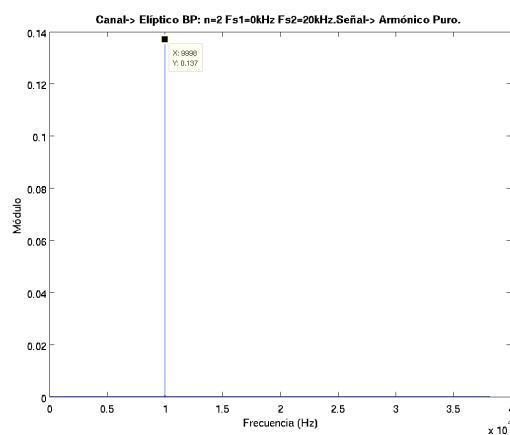
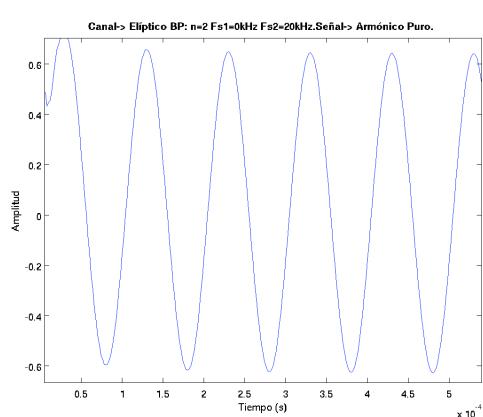
- Orden 10



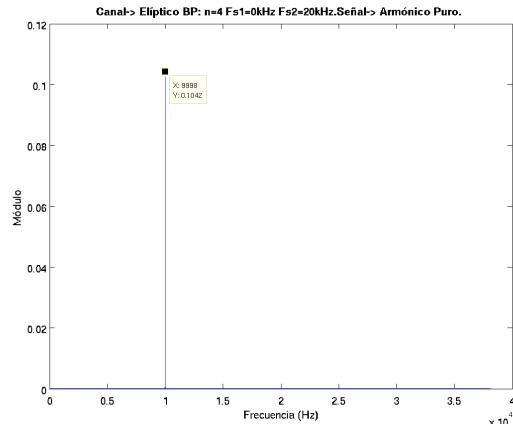
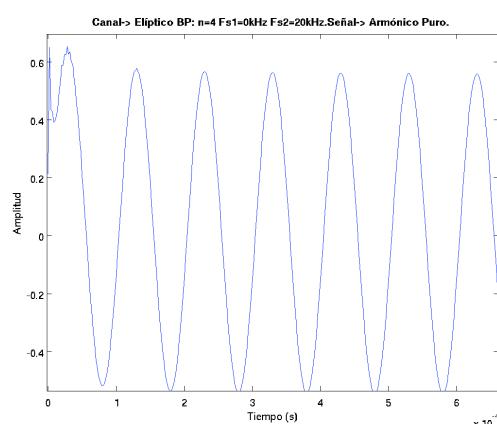
A.3.3. FILTRO TIPO ELÍPTICO.-

a. Armónico puro.

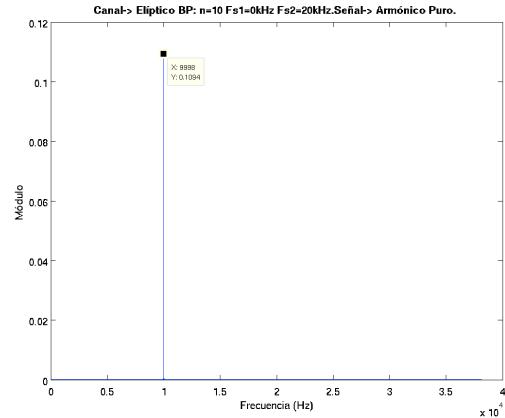
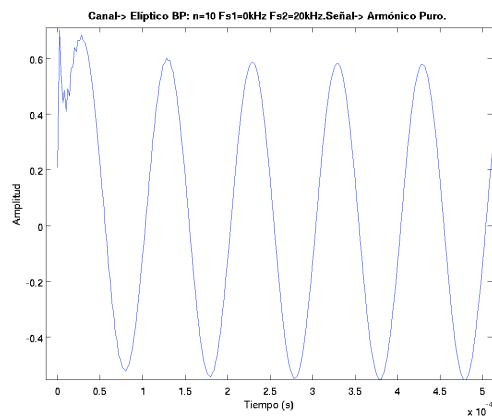
- Orden 2



- Orden 4

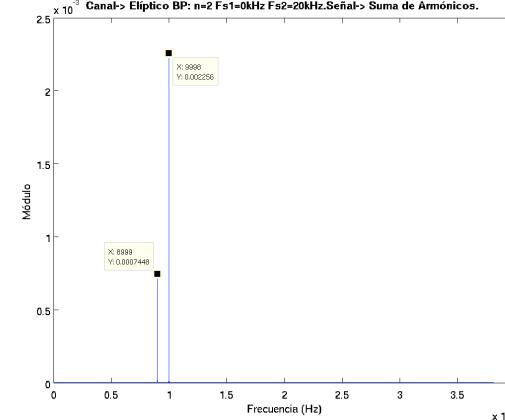
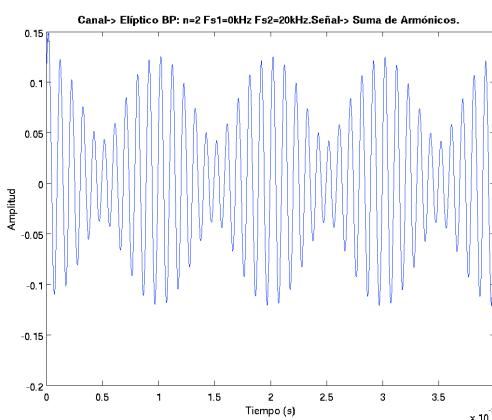


- Orden 10

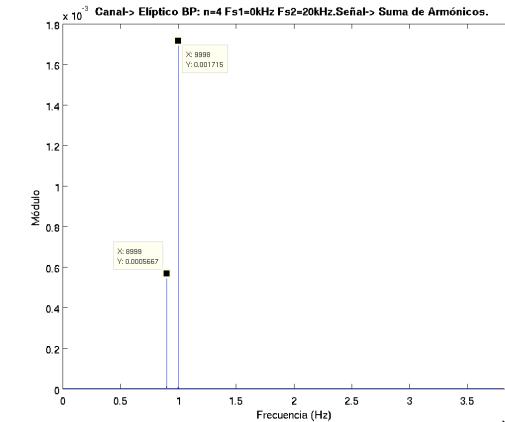
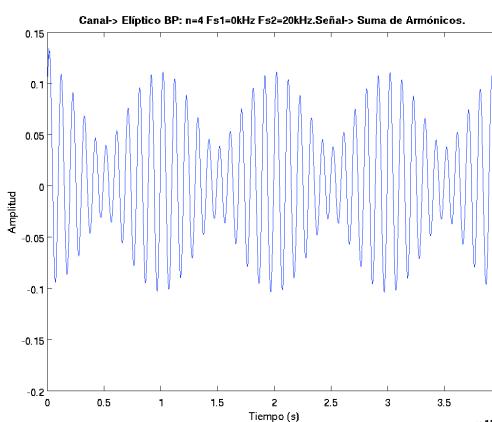


b. Suma de armónicos.

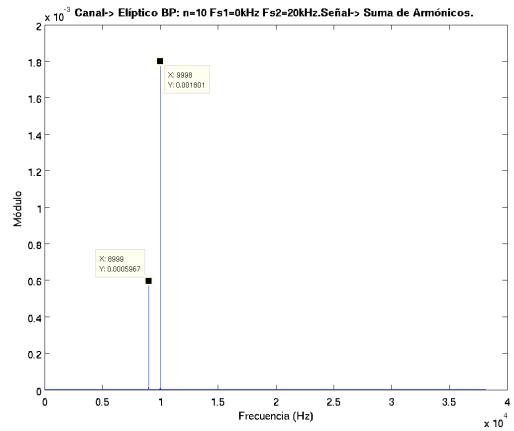
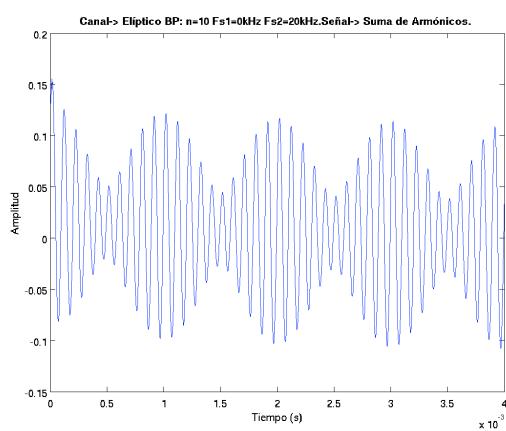
- Orden 2



- Orden 4

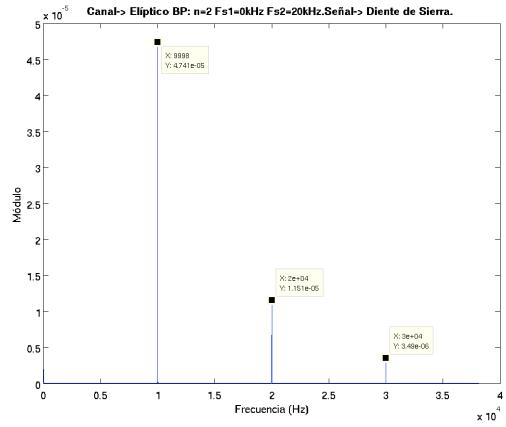
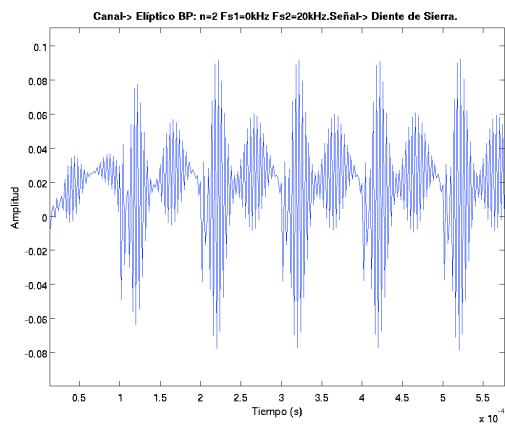


- Orden 10

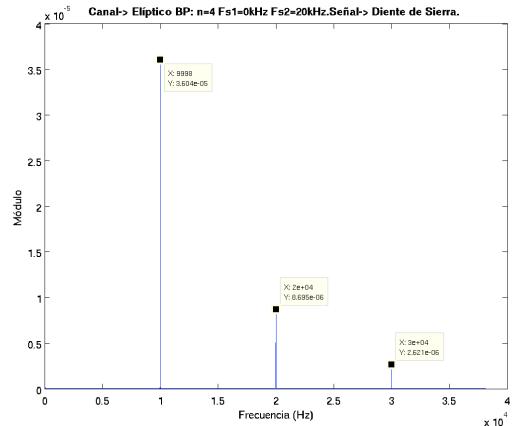
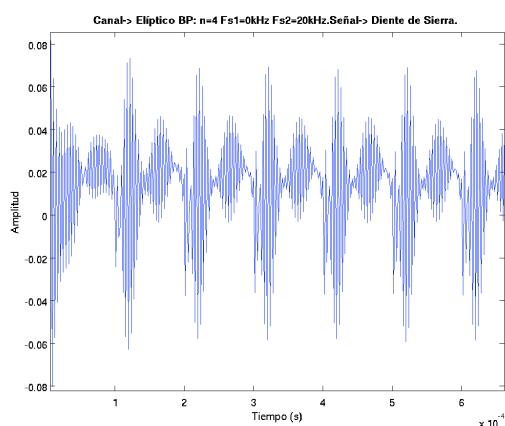


C. Diente de sierra.

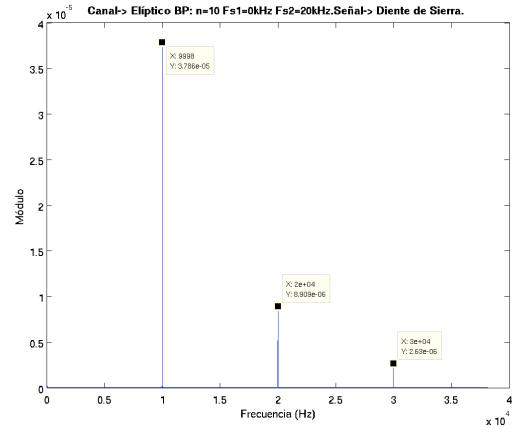
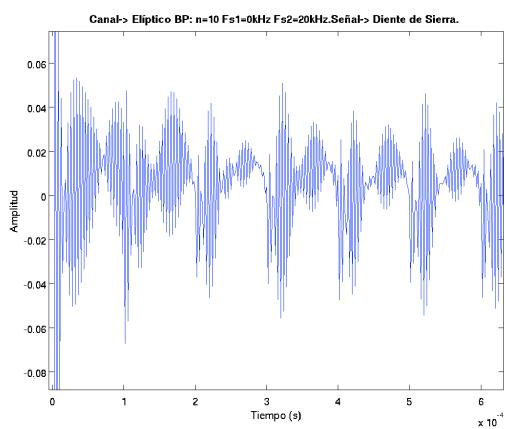
- Orden 2



- Orden 4

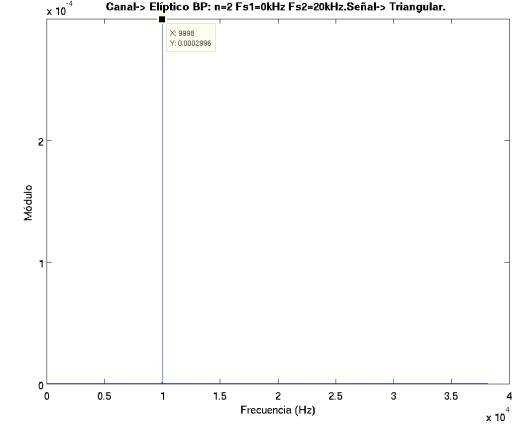
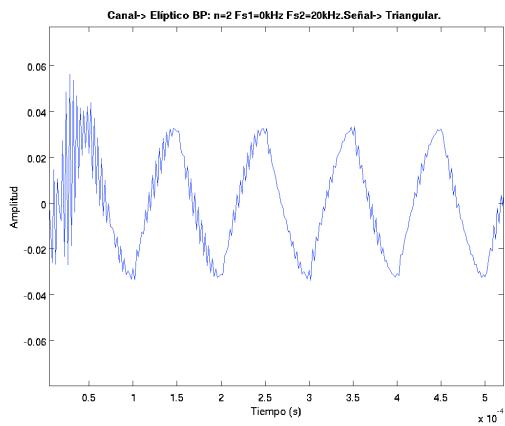


- Orden 10

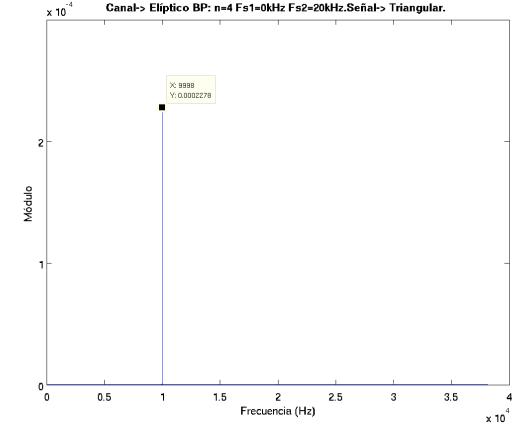
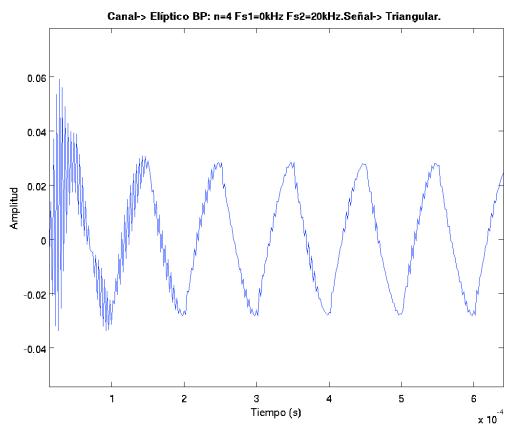


d. Triangular.

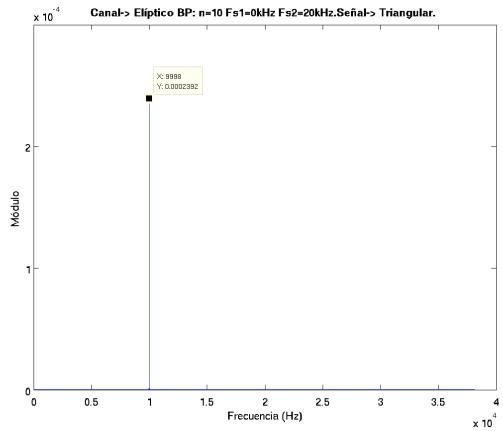
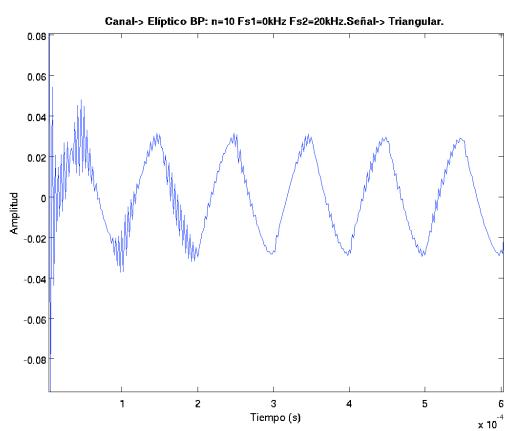
- Orden 2



- Orden 4

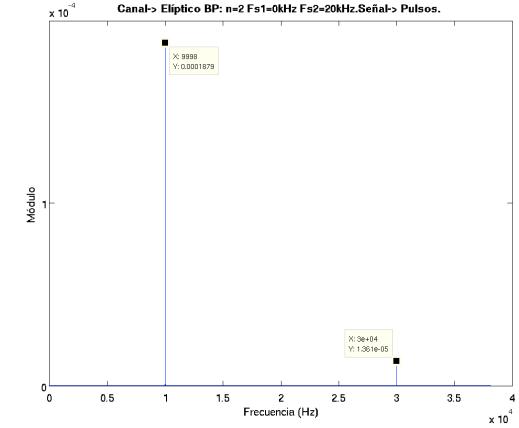
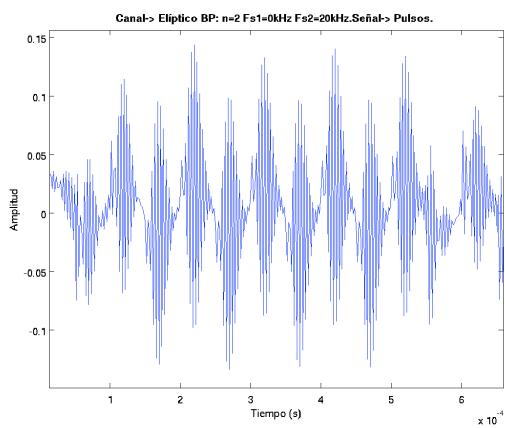


- Orden 10

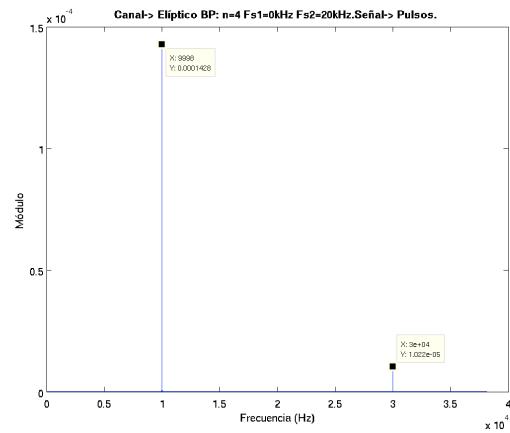
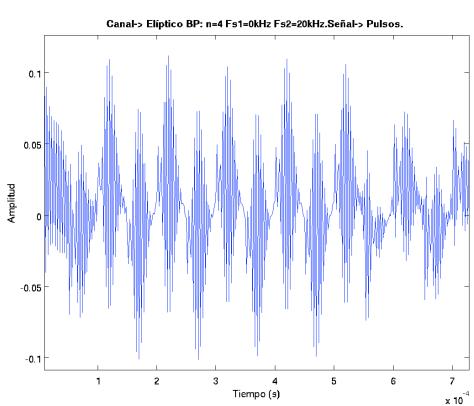


e. Pulsos.

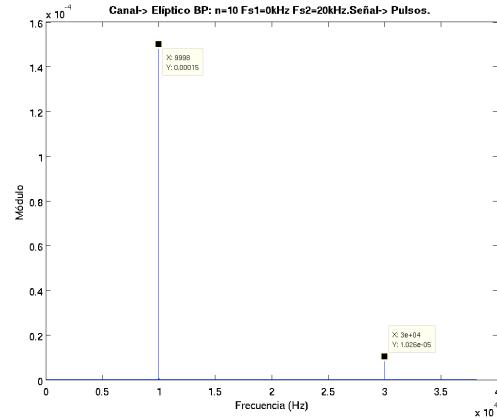
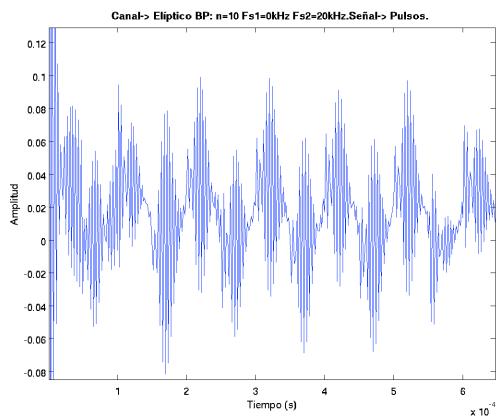
- Orden 2



- Orden 4

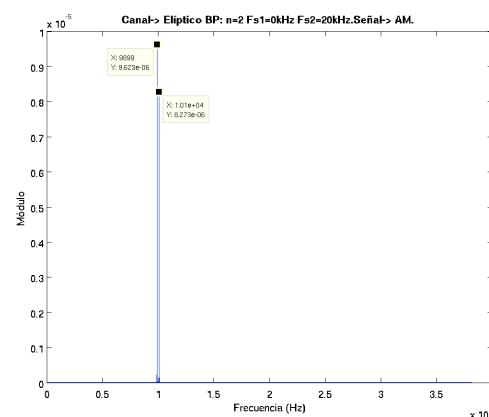
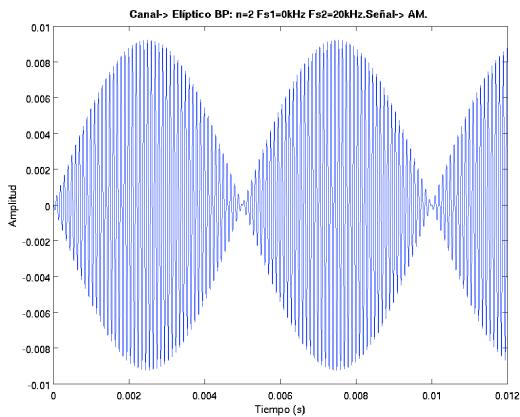


○ *Orden 10*

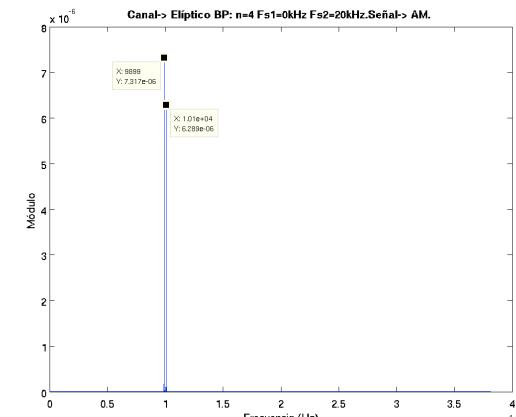
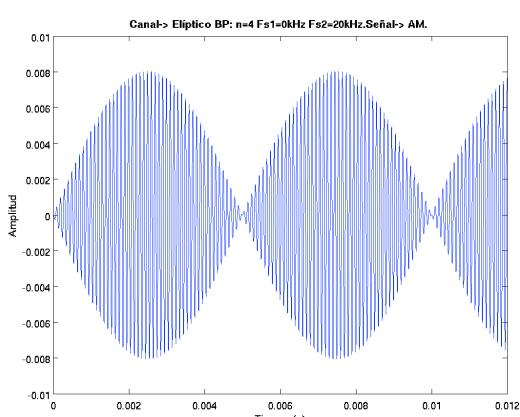


f. Señal modulada AM.

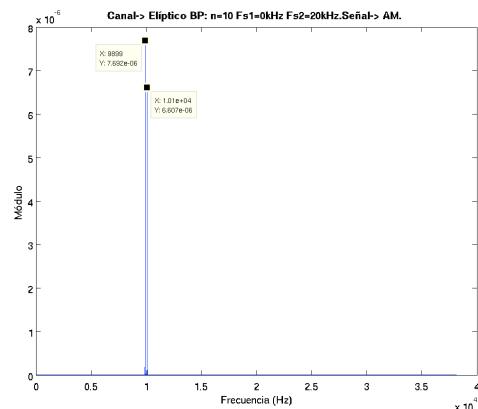
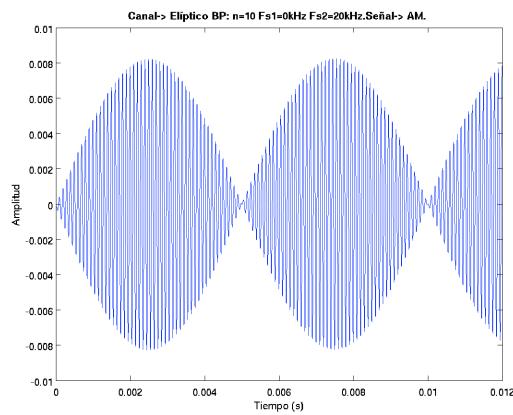
○ *Orden 2*



○ *Orden 4*

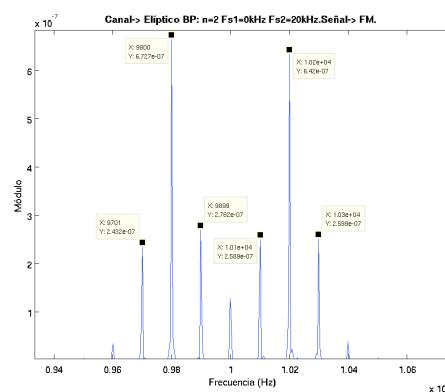
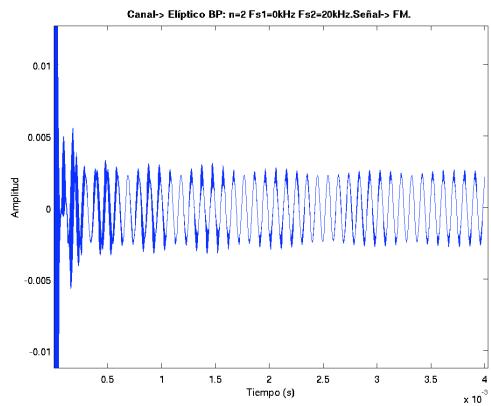


○ Orden 10

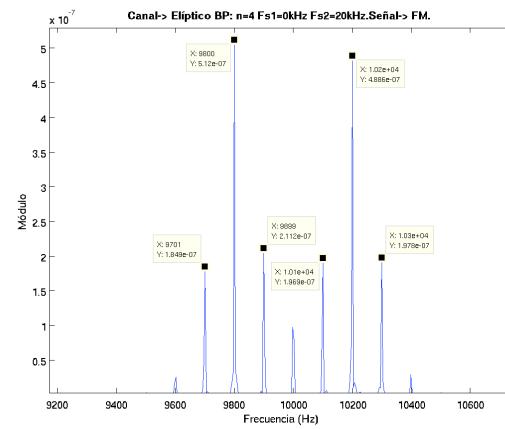
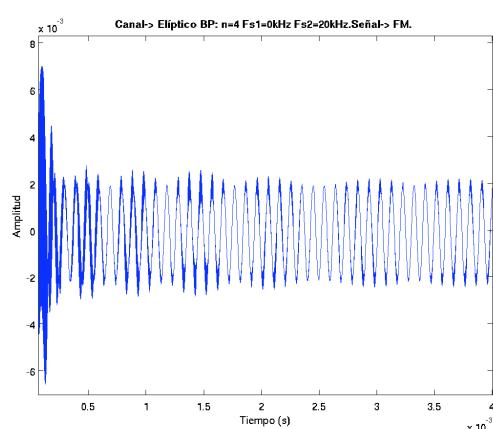


g. Señal modulada FM.

○ Orden 2



○ Orden 4



- Orden 10

