

Proyecto 3.2

Transceiver FM

Integrantes: Vincko Fabres Á.
Almendra Pizarro M.
Profesor: Cesár Azurdia M.
Auxiliar: Diego S. Wistuba La Torre
Javier Rojas C.
Pablo Palacios J.
Sandy Bolufe
Ayudantes: Martín D. Cádiz
Catalina Murua F.
Fecha de entrega: 7 de agosto de 2021
Santiago, Chile

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Marco teórico: Modulación FM	2
3. Marco teórico: ¿Que es el ruido gaussiano o AWGN?	5
4. Desarrollo	6
4.1. Caracterización del mensaje que se desea transmitir (moduladora)	6
4.2. Modulación de la señal	10
4.3. Adición de Ruido AWGN a la señal modulada.	16
4.4. Demodulación de la señal	26
5. Discusión y conclusiones	28
Referencias	29

Índice de Figuras

1. Diagrama del sistema a trabajar.	1
2. Gráfico de Modulación FM	2
3. Proceso de modulación FM	3
4. Señal FM en el tiempo y su espectro en frecuencia	4
5. Comparación entre la misma imagen con y sin ruido gaussiano.	5
6. Señal up chirp en función del tiempo y la frecuencia.	8
7. Señal down chirp en función del tiempo y la frecuencia.	8
8. Señal a ser modulada.	9
9. Gráfico de la señal portadora.	11
10. Señal modulada con desviación de 100Hz.	14
11. Señal modulada con desviación de 1kHZ.	14
12. Señal modulada con desviación de 10kHz	15
13. Señal modulada con desviación de 50kHz	15
14. Poder del vector x	16
15. Formula para encontrar el vector de ruido.	16
16. Señal mas ruido en el tiempo para señal de 100Hz	23
17. Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 100Hz	23
18. Señal mas ruido en el tiempo para señal de 1KHz	24
19. Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 1Khz	24
20. Señal mas ruido en el tiempo para señal de 10KHz	25
21. Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 10KHz	25
23. Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 50KHz	26
24. Señal demodulada para 100Hz con distintos SNR	27

Índice de Códigos

1.	Codigo señal up-chirp	6
2.	Codigo parte 1.a señal down-chirp	7
3.	Concatenación de señales para generar la señal que sera modulada posteriormente.	8
4.	Generación de onda portadora.	10
5.	Modulación del mensaje aplicando modulación FM con distintas desviaciones de frecuencia.	11
6.	generación de función ruido	16
7.	Aplicación de ruido a las señales obtenidas en la sección anterior.	16
8.	ejemplo de demodulacion de la señal	26

1. Introducción

Durante esta experiencia, se busca interiorizar y aplicar los conocimientos sobre modulación y demodulación FM.

La modulación FM, es una técnica de modulación angular que permite transmitir información a través de una onda portadora variando su frecuencia. Esta técnica, tiene diversas aplicaciones analógicas y además, hace posible enviar datos digitales por el desplazamiento de la onda de frecuencia entre un conjunto de valores discretos. Esta modulación es conocida como modulación por desplazamiento de frecuencia.

En el presente informe se realizará la simulación de un sistema FM, donde se simularán las entradas y salidas de un sistema básico de comunicación analógica FM descrito en la figura 1. Para esto se asume un canal constante con ganancia unitaria y fase lineal, es decir, un canal perfecto. El sistema es afectado únicamente por ruido AWGN.

El procedimiento utilizado para el proceso se divide en cuatro secciones las cuales serán exploradas en la sección de desarrollo del informe. Estas secciones consisten en caracterización del mensaje que se desea transmitir (moduladora), modulación de la señal, adición de Ruido AWGN a la señal modulada y demodulación de la señal.

Para el desarrollo de esta actividad se usará el software computacional matlab.

El presente informe posee:

- Marco teórico: Se explicarán a detalle qué es una señal FM, qué son los chirps y ruido AWGN.
- Descripción: Explicación del código y las decisiones tomadas para realizarlo en conjunto con los gráficos obtenidos para cada sección.
- Discusión y conclusiones: Destaca las conclusiones más importantes y se proponen mejoras de implementación.

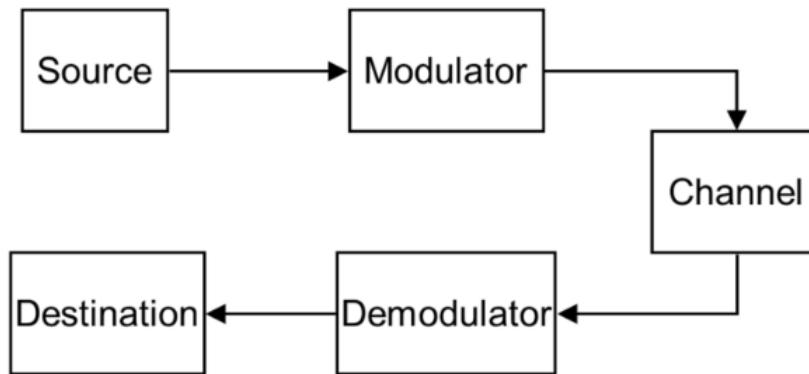


Figura 1: Diagrama del sistema a trabajar.

2. Marco teórico: Modulación FM

La modulación FM es la codificación de información en la onda portadora, es se hace variando la frecuencia instantánea de la onda. Esta tecnología es usada en telecomunicaciones, emisoras de radio, procesamiento de señales y computación.

Este tipo de modulación, se usa comúnmente en una banda de muy alta frecuencia para poder realizar la radiodifusión de música, habla y audio en televisión analógica. Cuando se requiere comunicación de radio de dos vías, se utiliza una transmisión de banda estrecha o N-FM, a diferencia del tipo de radio comercial que es llamado FM o W-FM. esto también es utilizado para poder enviar señales al espacio.

Si la información a ser transmitida(señal base) es $x_m(t)$ y la portadora sinusoidal es $x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$ con f_c la frecuencia base de la portadora y A_c la amplitud de la portadora, el modulador combina la portadora con los datos de la señal pasa banda para obtener la señal transmitida. En el caso de señales sinusoidales el índice de modulación b_f es igual a $\Delta f_{rec}/f_{mmax}$ con f_m la frecuencia de la señal modulante.

$$\begin{aligned} y(t) &= A_c \cos(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau) \\ &= A_c \cos(2\pi \int_0^t [f_c + f_\Delta x_m(\tau)] d\tau) \\ &= A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_0^t x_m(\tau) d\tau) \end{aligned} \quad (1)$$

Las señales FM pueden ser generadas usando modulación de frecuencia directa o indirecta, la modulación FM directa se consigue alimentando directamente el mensaje en el input de un oscilador de voltaje controlado. Para la modulación FM indirecta, la señal de mensaje es integrada para generar una señal modulada en fase, eso se usa para modular un oscilador controlado por cristal y el resultado de este se pasa por un multiplicador de frecuencia para producir la señal FM.

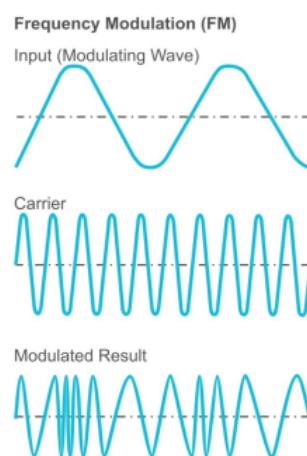


Figura 2: Gráfico de Modulación FM

La Modulacion FM tiene distintas aplicaciones:

- Doppler effect: Cuando un murciélagos eco localizado se aproxima a un objetivo, sus sonidos se devuelven como ecos, los cuales son doppler cambiados hacia una frecuencia hacia arriba. En algunas especies de murciélagos que producen llamados de ecolocalización de frecuencia constante, los murciélagos compensan el cambio de doppler bajando la frecuencia de llamado cuando se aproximan a un objetivo. Esto muestra un tipo de modulación de frecuencia dinámico llamado Doppler Shift compensation.
- Magnetic tape storage: La modulación FM es también usada a frecuencias intermedias por sistemas de VCR analógicos (como el VHS), para grabar las porciones de luminiscencias de la señal de video. Estos sistemas FM son inusuales, ya que tienen un radio de la onda portadora al máximo de la frecuencia de modulación.
- Sonido: También es usada para sintetizar sonidos mediante frecuencias de audio, esta técnica se conoce como síntesis FM y se volvió una parte estándar en muchas generaciones de tarjetas de sonidos para computadoras personales.
- Radio: Una señal FM también puede ser usada para portar una señal stereo, esto se hace multiplexando y demultiplexando antes y después del proceso FM. El proceso de modulación y demodulación de la señal FM es idéntico en procesos monoaural y estéreo.

Finalmente, la modulación FM provee una radio de señal a ruido mucho mejor en comparación con la demodulación AM. La señal FM típicamente tiene un bajo SNR dejaba del nivel de señal llamado ruido umbral. este SNR es mucho mejor que para la modulación AM. Esta mejora depende de el nivel de modulación y desviación.

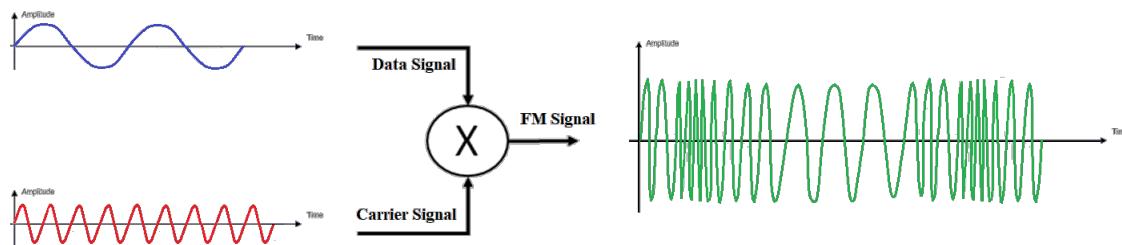


Figura 3: Proceso de modulación FM

Aquí podemos ver una representación del espectro FM en función del tiempo y la frecuencia.

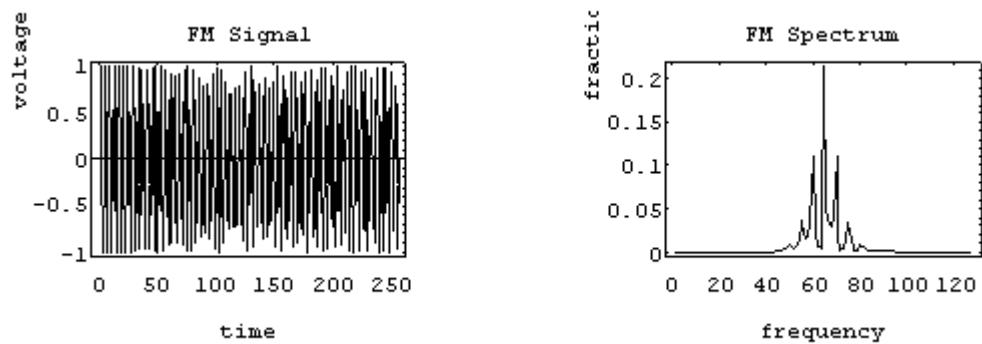


Figura 4: Señal FM en el tiempo y su espectro en frecuencia

3. Marco teórico: ¿Que es el ruido gaussiano o AWGN?

El ruido gaussiano es un ruido estadístico, con la probabilidad de la función de densidad igual a la de la distribución normal. En otras palabras, los valores que el ruido puede tomar, están distribuidos de forma gaussiana. La función de la densidad de probabilidad p, de una variable gaussiana random z esta dado por:

$$p_G(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Donde z representa el nivel gris, μ representa el valor gris promedio y *sigma* es la desviación estándar. En telecomunicaciones y en computación de redes, los canales de comunicación pueden ser afectados por una ruido gausiano de banda ancha que proviene de fuentes naturales, como las vibraciones termales de los átomos en los conductores, sonido de disparo, radiación de objetos calientes o incluso del sol.

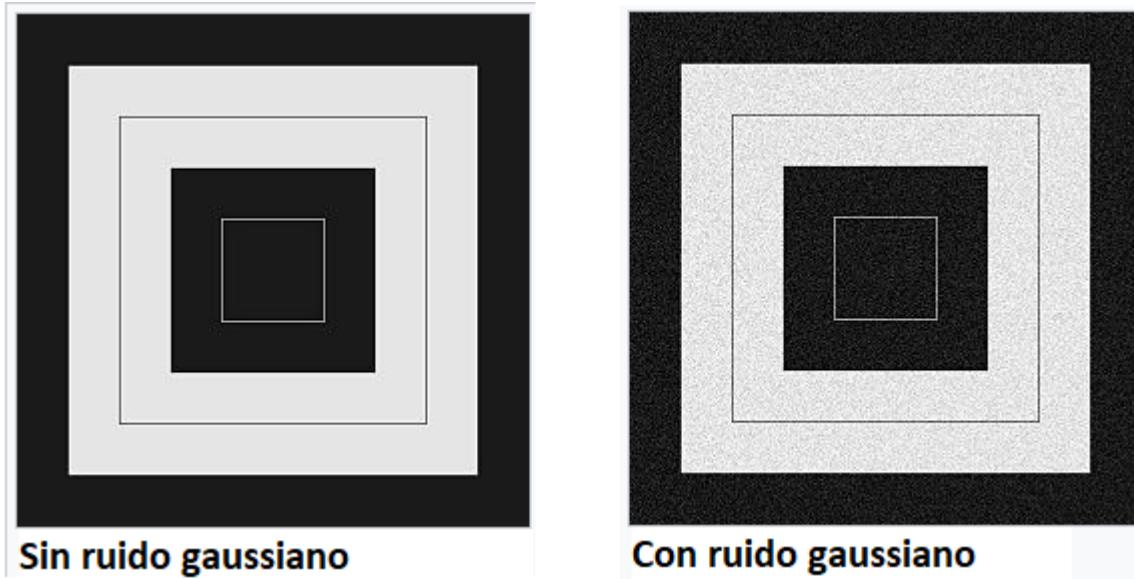


Figura 5: Comparación entre la misma imagen con y sin ruido gaussiano.

4. Desarrollo

En el desarrollo de este proyecto, en el cual se busca simular las entradas y salidas de un sistema básico de comunicación analógico FM, se dividirá en cuatro secciones. Además, se asumirá un canal constante con ganancia unitaria y fase lineal (canal perfecto). El sistema es afectado únicamente por ruido AWGN.

Los segmentos en los que se divide el trabajo son:

- Caracterización del mensaje que se desea transmitir (moduladora).
- Modulación de la señal.
- Adición de Ruido AWGN a la señal modulada.
- Demodulación de la señal.

4.1. Caracterización del mensaje que se desea transmitir (moduladora)

Para caracterizar el mensaje a transmitir, el primer paso fue generar una señal up-chirp con un voltaje pico-pico de 3 voltios, frecuencia inicial de 1.6kHz y frecuencia final de 3.0kHz; también se generara una señal down-chirp con frecuencia inicial de 1.5kHz y frecuencia final de 300Hz. Para esto se asume un barrido lineal de frecuencia y una fase inicial nula.

Para generar estas señales, se uso como guía el código entregado por el profesor y se modificaron los aspectos como la frecuencia de modulación, ademas de la frecuencia inicial y final de las señales.

Código 1: Código señal up-chirp

```

1  %%
2 clear all
3 close all
4 clc
5 %% Parte 1
6 %Señal moduladora secuencia de Chirp
7 %-----
8 %Señal up-chirp con frecuencia inicial f0 y frecuencia final.
9 %Se utiliza una resolución temporal para el barrido de 1 segundo.
10 fs_up=94.1*10^4*2;           %frecuencia de muestreo
11 t=0:1/fs_up:1;              %base temporal para el ploteo de la señal
12 f0=1600;                   %frecuencia inicial
13 f1=3000;                   %frecuencia final
14
15 up=chirp_signal(t,f0,1,f1); %Función Chirp
16
17 figure()
18 subplot(2,1,1);
19 plot(t,up);
20 title('Up-Chirp Signal');
21 xlabel('Tiempo [s]');
22 ylabel('Amplitud[V]');
23
24 dt=1/fs_up; %Paso del Tiempo en segundos.
25 t=0:dt:1; %Base temporal de 1. para el ploteo de la señal.
26 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.

```

```

27
28 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
29 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
30
31 subplot(2,1,2);
32 plot(fshift,fftshift(abs(fft(up)/fs_up))) %Gráfico de la señal modulante en el
33 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
34 title('Up-Chirp Signal en el dominio de la frecuencia');
35 xlabel('frecuencia [Hz]');
36 ylabel('|F(Hz)|');
37 axis([1450 3050 0 inf])

```

Código 2: Código parte 1.a señal down-chirp

```

1 %-----
2 %Señal down-chirp con frecuencia inicial f0 y f1 frecuencia final.
3 %Se utiliza una resolución temporal para el barrido de 1 segundo.
4 fs_down=94.1*10^4*2; %frecuencia de muestreo
5 t=0:1/fs_down:1; %base temporal para el ploteo de la señal
6 f0=1500; %frecuencia inicial
7 f1=300; %frecuencia final
8
9 down=chirp_signal(t,f0,1,f1); %Función Chirp
10
11 figure()
12 subplot(2,1,1);
13 plot(t,down);
14 title('Down-Chirp Signal');
15 xlabel('Tiempo [s]');
16 ylabel('Amplitud[V]');
17
18 dt=1/fs_down; %Paso del Tiempo en segundos.
19 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
20 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
21
22 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
23 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
24 subplot(2,1,2);
25 plot(fshift,fftshift(abs(fft(down)/fs_down))) %Gráfico de la señal modulante en el
26 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
27 title('Down-Chirp Signal en el dominio de la frecuencia');
28 xlabel('frecuencia [Hz]');
29 ylabel('|F(Hz)|');
30 axis([250 1550 0 inf])

```

Estos códigos generan los siguientes gráficos, en donde se pueden apreciar el cambio de las señales en el tiempo y en la frecuencia.

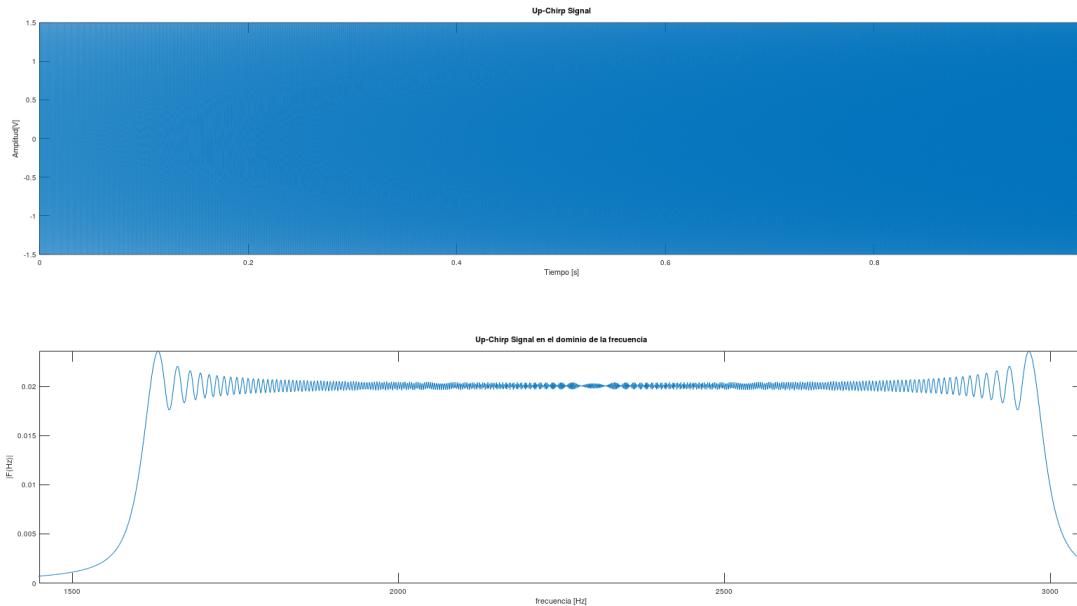


Figura 6: Señal up chirp en función del tiempo y la frecuencia.

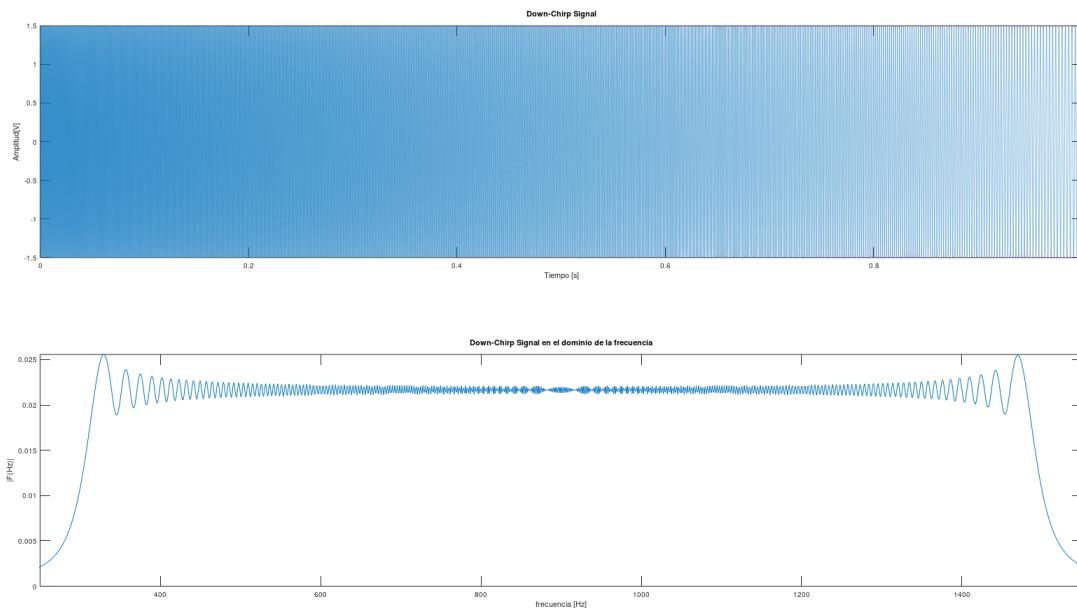


Figura 7: Señal down chirp en función del tiempo y la frecuencia.

Luego de esto, la señal a ser modulada sera la superposición de las señales up y down generadas, para esto se utilizo el siguiente código:

Código 3: Concatenación de señales para generar la señal que sera modulada posteriormente.

```

1 %señal a modular = up + down chirp
2 senal = up + down;
3 figure()
4 subplot(2,1,1);
5 plot(t,senal);
6 title('Señal a ser Modulada');
7 xlabel('Tiempo [s]');
8 ylabel('Amplitud[V]');
9
10 dt=1/fs_down; %Paso del Tiempo en segundos.
11 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
12 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
13
14 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
15 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
16 subplot(2,1,2);
17 plot(fshift,fftshift(abs(fft(senal)/fs_up))) %Gráfico de la señal modulante en el
18 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
19 title('Señal a ser modulada en el dominio de la frecuencia');
20 xlabel('frecuencia [Hz]');
21 ylabel('|F(Hz)|');
22 axis([250 3100 0 inf])

```

Con esto obtenemos finalmente la señal a modular, la cual se puede observar en el siguiente gráfico.

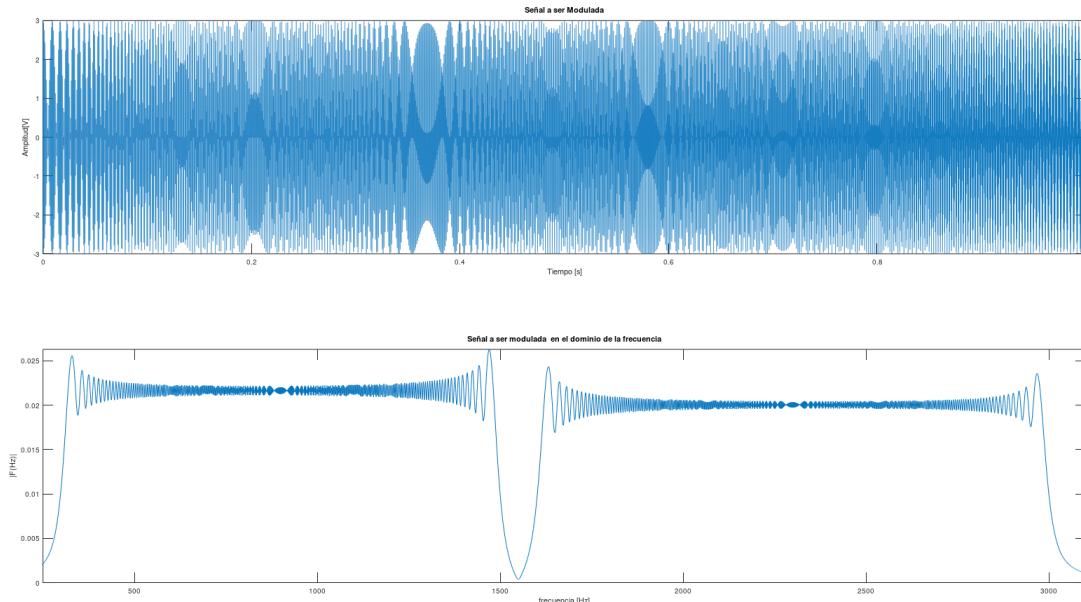


Figura 8: Señal a ser modulada.

4.2. Modulación de la señal

Para esta sección, se pedía generar una onda portadora con una amplitud pico-pico de 3 voltios y frecuencia central de 94.1MHz, sin embargo dada la capacidad limitada de nuestros computadores, se bajo la frecuencia central a 941kHz y con esto la frecuencia de muestreo se estandarizo para todas las secciones y se fijo en 941KHz multiplicado por 4.

Con esto se procedió a generar la onda portadora, con el siguiente código.

Código 4: Generación de onda portadora.

```
1 %% Parte 2
2 fs=94.1*10^4*4 ; %frecuencia de muestreo
3 t=0:1/fs:1; %base temporal para el ploteo de la señal
4 portadora = 1.5*cos(2*pi*94.1*10^4*t);
5
6 figure()
7 subplot(2,1,1);
8 plot(t,portadora) %Gráfico de la señal modulante en el
9 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
10 title('Señal portadora');
11 xlabel('Tiempo [s]');
12 ylabel('Amplitud [V]');
13 axis([0 1 -2 2])
14
15 dt=1/fs; %Paso del Tiempo en segundos.
16 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
17 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
18
19 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
20 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
21 subplot(2,1,2);
22 plot(fshift,fftshift(abs(fft(portadora)/fs))) %Gráfico de la señal modulante en el
23 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
24 title('Señal portadora en el dominio de la frecuencia');
25 xlabel('frecuencia [Hz]');
26 ylabel('|F(Hz)|');
27 axis([0 94.1*10^4*2 0 inf])
```

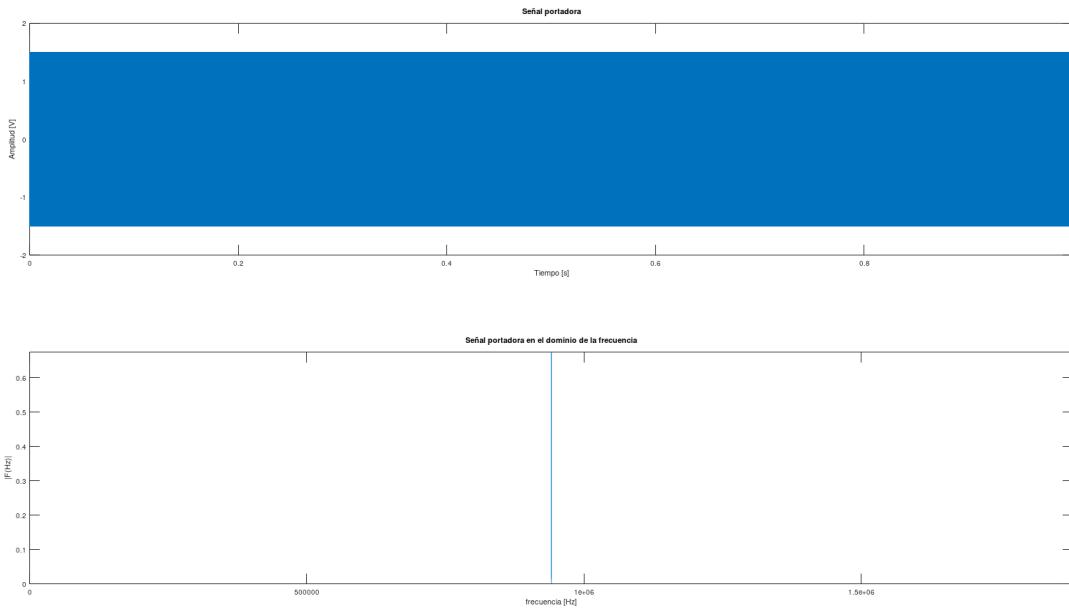


Figura 9: Gráfico de la señal portadora.

Luego de esto, para poder modular la señal es necesario tener todas las partes de la ecuación

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_0^t x_m(\tau) d\tau) \quad (3)$$

En esta sección, lo mas complicado de trasladar al software matlab fue la parte de la integral, en un inicio se intento realizar con la función trapz() de matlab pero esto no funciono ya que trapz() no daba los resultados de la integral en el tiempo y solo entregaba un resultado total. Para resolver esto se termino utilizando el comando cumsum() el cual retorna la suma acumulativa del área bajo la curva de la señal. Además esta función fue multiplicada por el dt del tiempo. Así es como se genero el siguiente código:

Código 5: Modulación del mensaje aplicando modulación FM con distintas desviaciones de frecuencia.

```

1  %% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
2
3  t=0:1/fs:1;
4  dt=1/fs;
5  m1=100; %1000/94.1*10^6
6  m2=1000;
7  m3=10000;
8  m4=50000;
9  inte=dt*cumsum(senal);
10 %inte=trapz(0:1/fs_up:1,señal);
11 modulada1=1.5*cos(2*pi*94.1*10^4*t+2*pi*m1*inte);
12 modulada2=1.5*cos(2*pi*94.1*10^4*t+2*pi*m2*inte);
13 modulada3=1.5*cos(2*pi*94.1*10^4*t+2*pi*m3*inte);
14 modulada4=1.5*cos(2*pi*94.1*10^4*t+2*pi*m4*inte);

```

```
15
16 figure()
17 subplot(2,1,1);
18 plot(0:1/fs:1,modulada1); %Gráfico de la señal modulante en el
19 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
20 title('Señal modulada f_d = 100[Hz]');
21 xlabel('Tiempo [s]');
22 ylabel('Amplitud [V]');
23 axis([0 inf -2 2])
24
25 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
26 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
27 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
28 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
29
30 subplot(2,1,2);
31 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada1)/fs))) %Gráfico de la señal modulante en el
32 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
33 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 100[Hz]');
34 xlabel('frecuencia [Hz]');
35 ylabel('|F(Hz)|');
36 axis([9.39*10^5 9.43*10^5 0 0.01])
37
38
39
40 figure()
41 subplot(2,1,1);
42 plot(0:1/fs_up:1,modulada2); %Gráfico de la señal modulante en el
43 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
44 title('Señal modulada f_d = 1[KHz]');
45 xlabel('Tiempo [s]');
46 ylabel('Amplitud [V]');
47 axis([0 inf -2 2])
48
49 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
50 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
51 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
52 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
53 subplot(2,1,2);
54 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada2)/fs_up))) %Gráfico de la señal modulante en el
55 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
56 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia,f_d = 1[kHz]');
57 xlabel('frecuencia [Hz]');
58 ylabel('|F(Hz)|');
59 axis([9.36*10^5 9.47*10^5 0 0.06])
60
61
62
63 figure()
64 subplot(2,1,1);
65 plot(0:1/fs_up:1,modulada3); %Gráfico de la señal modulante en el
```

```
66 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
67 title('Señal modulada f_d = 10[kHz]');
68 xlabel('Tiempo [s]');
69 ylabel('Amplitud [V]');
70 axis([0 inf -2 2])
71
72 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
73 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
74 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
75 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
76 subplot(2,1,2);
77 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada3)/fs_up))) %Gráfico de la señal modulante en el
78 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
79 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 10[kHz]');
80 xlabel('frecuencia [Hz]');
81 ylabel('|F(Hz)|');
82 axis([9*10^5 9.82*10^5 0 0.026])
83
84
85
86 figure()
87 subplot(2,1,1);
88 plot(0:1/fs_up:1,modulada4); %Gráfico de la señal modulante en el
89 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
90 title('Señal modulada f_d = 50[kHz]');
91 xlabel('Tiempo [s]');
92 ylabel('Amplitud [V]');
93 axis([0 inf -2 2])
94
95 t=0:dt:1; %Base temporal de 0.2 segundos para el ploteo de la señal.
96 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
97 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
98 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
99 subplot(2,1,2);
100 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada4)/fs_up))) %Gráfico de la señal modulante en el
101 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
102 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = = 50[kHz]');
103 xlabel('frecuencia [Hz]');
104 ylabel('|F(Hz)|');
105 axis([7.5*10^5 11.32*10^5 0 0.01])
```

Con esto se generaron los siguientes gráficos para las distintas desviaciones de frecuencias dadas en el enunciado, siendo estas $\delta f=100\text{Hz}$, $\delta f=1\text{kHz}$, $\delta f=10\text{kHz}$ y $\delta f=50\text{kHz}$.

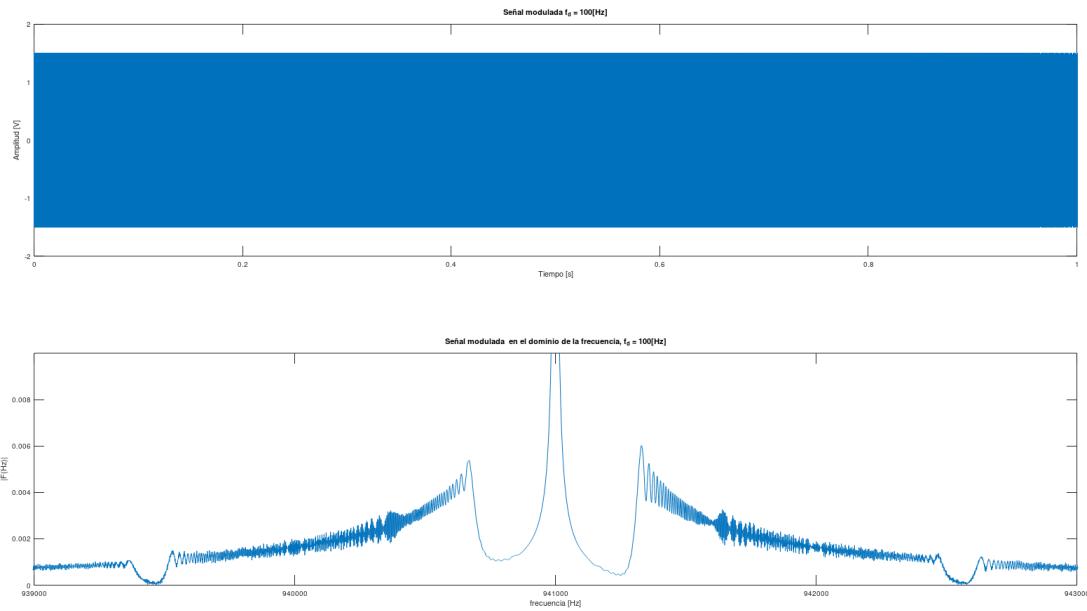


Figura 10: Señal modulada con desviación de 100Hz.

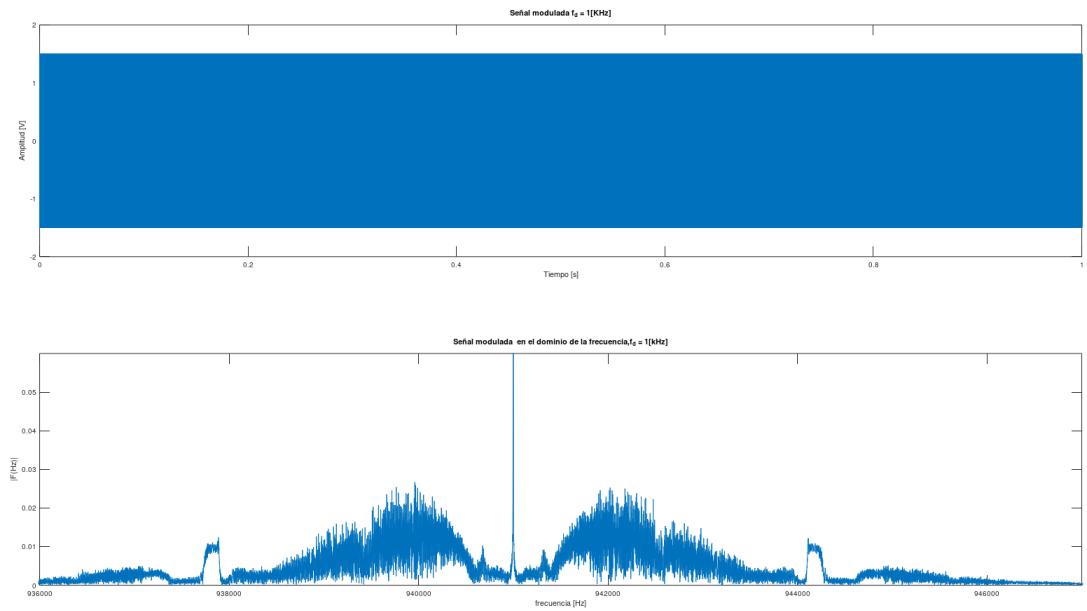


Figura 11: Señal modulada con desviación de 1kHz.

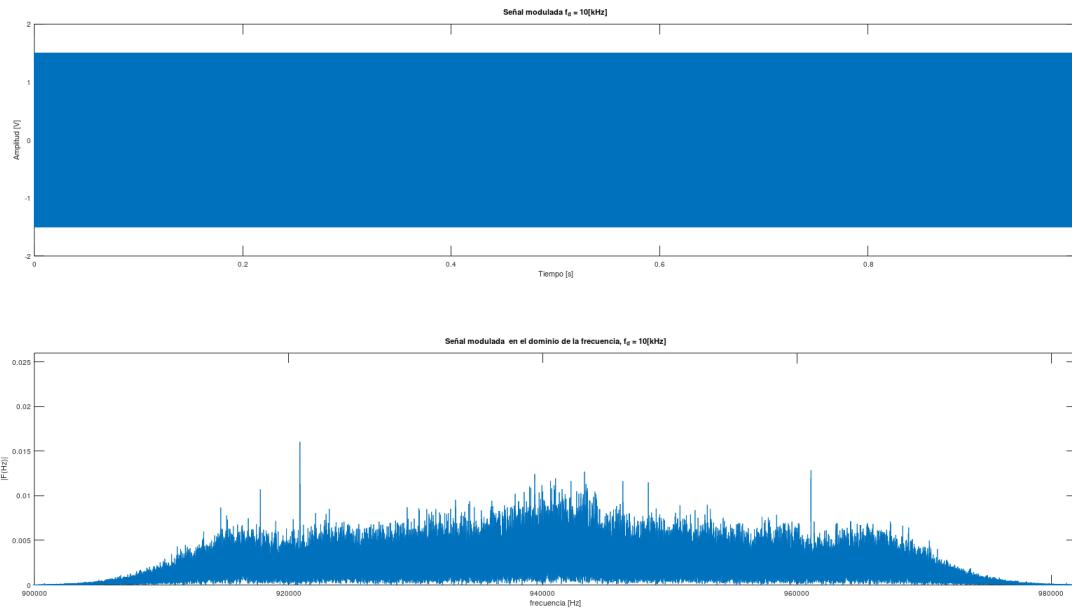


Figura 12: Señal modulada con desviación de 10kHz

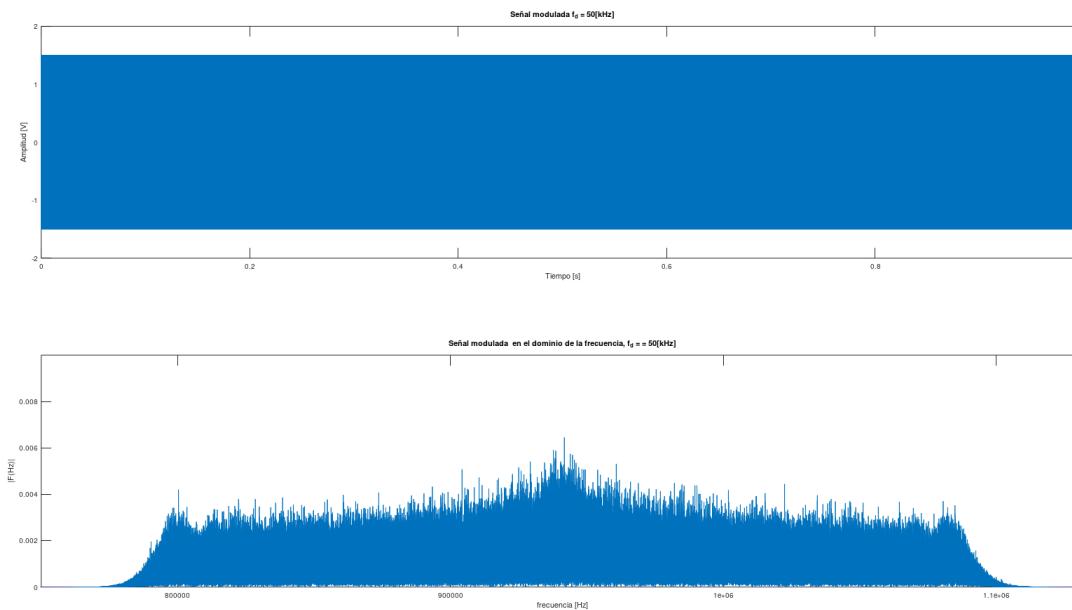


Figura 13: Señal modulada con desviación de 50kHz

Los indices de modulacion para las señales se pueden obtener mediante la formula $\beta_f = \frac{f_d}{(f_{modulante})_{max}}$, debido a que corresponde a sinusoides, siendo los valores de f_d [100,1000,10000,50000] y sus índices de modulación [0.033,0.333,3.333,16.666] respectivamente.

4.3. Adición de Ruido AWGN a la señal modulada.

Para esta sección se pide añadir un ruido aditivo AWGN con un SNRdB = 5dB, 15dB y de 30dB para cada una de las señales moduladas generadas anteriormente. Para generar el ruido, se creó una función aparte llamada "ruido", la cual agrega un vector de ruido a la señal x. Para generar el código se siguió el siguiente procedimiento:

- se asume que tenemos un vector x en el cual ruido AWGN necesita ser añadido para un específico SNR en db.
- Se mide el poder en el vector x usando la fórmula de la figura 14, con L= largo de x
- Se convierte el SNR dado en dB a una escala lineal y se encuentra el vector de ruido utilizando la ecuación de la figura 15.
- Finalmente el ruido se agrega a la señal x de la forma y= x+ ruido.

$$E_s = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} |x[i]|^2$$

Figura 14: Poder del vector x

$$\sqrt{\frac{E_s}{SNR_{lin}}} * randn(1,L) = \text{Ruido}$$

Figura 15: Fórmula para encontrar el vector de ruido.

Tomando en consideración lo anterior, se procede a generar el siguiente código para el ruido AWGN.

Código 6: generación de función ruido

```

1 function [y,n]=ruido(x,SNR_dB)
2 %[y,n]=ruido(x,SNR) agrega un vector de ruido AWGN a señal x
3 % y es la señal resultante y n el vector de ruido
4 L=length(x);
5 SNR = 10^(SNR_dB/10);
6 S=sum(abs(x).^2)/(L);
7 N0=S/SNR; %Densidad espectral del ruido
8 noiseSigma = sqrt(N0); %Standard deviation for AWGN Noise
9 n = noiseSigma*randn(1,L); %computed noise
10 y = x + n;
11 end

```

Código 7: Aplicación de ruido a las señales obtenidas en la sección anterior.

```

1 %% Parte 3
2

```

```
3 SNR_dB1=5;
4 SNR_dB2=15;
5 SNR_dB3=30;
6 SNR_dB=[SNR_dB1,SNR_dB2,SNR_dB3];
7
8 ruido1_5 = ruido(modulada1,5);
9 ruido1_15 = ruido(modulada1,15);
10 ruido1_30 = ruido(modulada1,30);
11
12 ruido2_5 = ruido(modulada2,5);
13 ruido2_15 = ruido(modulada2,15);
14 ruido2_30 = ruido(modulada2,30);
15
16 ruido3_5 = ruido(modulada3,5);
17 ruido3_15 = ruido(modulada3,15);
18 ruido3_30 = ruido(modulada3,30);
19
20 ruido4_5 = ruido(modulada4,5);
21 ruido4_15 = ruido(modulada4,15);
22 ruido4_30 = ruido(modulada4,30);
23
24
25 figure()
26 subplot(4,1,1);
27 plot(0:1/fs_up:1,modulada1); %Gráfico de la señal modulante en el
28 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
29 title('Señal modulada f_d = 100[Hz]');
30 xlabel('Tiempo [s]');
31 ylabel('Amplitud [V]');
32 axis([0 inf -2 2])
33
34 subplot(4,1,2);
35 plot(0:1/fs_up:1,ruido1_5); %Gráfico de la señal modulante en el
36 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
37 title('Señal modulada f_d = 100[Hz] con ruido SNR_{dB}=5');
38 xlabel('Tiempo [s]');
39 ylabel('Amplitud [V]');
40 axis([0 inf -3.5 3.5])
41
42 subplot(4,1,3);
43 plot(0:1/fs_up:1,ruido1_15); %Gráfico de la señal modulante en el
44 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
45 title('Señal modulada f_d = 100[Hz] con ruido SNR_{dB}=15');
46 xlabel('Tiempo [s]');
47 ylabel('Amplitud [V]');
48 axis([0 inf -3.5 3.5])
49
50 subplot(4,1,4);
51 plot(0:1/fs_up:1,ruido1_30); %Gráfico de la señal modulante en el
52 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
53 title('Señal modulada f_d = 100[Hz] con ruido SNR_{dB}=30');
```

```
54 xlabel('Tiempo [s]');
55 ylabel('Amplitud [V]');
56 axis([0 inf -3.5 3.5])
57
58
59
60
61
62 figure()
63 t=0:dt:1;
64 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
65 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
66 subplot(4,1,1);
67 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
68 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada1)/fs)))
69 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 100[Hz]');
70 xlabel('frecuencia [Hz]');
71 ylabel('|F(Hz)|');
72 axis([9.39*10^5 9.43*10^5 0 0.01])
73 subplot(4,1,2);
74 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido1_5)/fs)))
75 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 100[Hz], SNR_{dB}=5');
76 xlabel('frecuencia [Hz]');
77 ylabel('|F(Hz)|');
78 axis([9.39*10^5 9.43*10^5 0 0.01])
79 subplot(4,1,3);
80 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido1_15)/fs)))
81 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 100[Hz], SNR_{dB}=15');
82 xlabel('frecuencia [Hz]');
83 ylabel('|F(Hz)|');
84 axis([9.39*10^5 9.43*10^5 0 0.01])
85 subplot(4,1,4);
86 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido1_30)/fs)))
87 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 100[Hz], SNR_{dB}=30');
88 xlabel('frecuencia [Hz]');
89 ylabel('|F(Hz)|');
90 axis([9.39*10^5 9.43*10^5 0 0.01])
91
92
93
94
95
96
97 figure()
98 subplot(4,1,1);
99 plot(0:1/fs_up:1,modulada2); %Gráfico de la señal modulante en el
100 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
101 title('Señal modulada f_d = 1[KHz]');
102 xlabel('Tiempo [s]');
103 ylabel('Amplitud [V]');
104 axis([0 inf -2 2])
```

```
105 subplot(4,1,2);
106 plot(0:1/fs_up:1,ruido2_5); %Gráfico de la señal modulante en el
107 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
108 title('Señal modulada f_d = 1[kHz] con ruido SNR_{dB}=5');
109 xlabel('Tiempo [s]');
110 ylabel('Amplitud [V]');
111 axis([0 inf -3.5 3.5])
112
113 subplot(4,1,3);
114 plot(0:1/fs_up:1,ruido2_15); %Gráfico de la señal modulante en el
115 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
116 title('Señal modulada f_d = 1[kHz] con ruido SNR_{dB}=15');
117 xlabel('Tiempo [s]');
118 ylabel('Amplitud [V]');
119 axis([0 inf -3.5 3.5])
120
121 subplot(4,1,4);
122 plot(0:1/fs_up:1,ruido2_30); %Gráfico de la señal modulante en el
123 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
124 title('Señal modulada f_d = 1[kHz] con ruido SNR_{dB}=30');
125 xlabel('Tiempo [s]');
126 ylabel('Amplitud [V]');
127 axis([0 inf -3.5 3.5])
128
129 figure()
130 t=0:dt:1;
131 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
132 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
133 subplot(4,1,1);
134 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
135 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada2)/fs)))
136 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 1[kHz]');
137 xlabel('frecuencia [Hz]');
138 ylabel('|F(Hz)|');
139 axis([9.36*10^5 9.47*10^5 0 0.06])
140 subplot(4,1,2);
141 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido2_5)/fs)))
142 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 1[kHz], SNR_{dB}=5');
143 xlabel('frecuencia [Hz]');
144 ylabel('|F(Hz)|');
145 axis([9.36*10^5 9.47*10^5 0 0.06])
146 subplot(4,1,3);
147 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido2_15)/fs)))
148 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 1[kHz], SNR_{dB}=15');
149 xlabel('frecuencia [Hz]');
150 ylabel(|F(Hz)|');
151 axis([9.36*10^5 9.47*10^5 0 0.06])
152 subplot(4,1,4);
153 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido2_30)/fs)))
154 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 1[kHz], SNR_{dB}=30');
```

```
156 xlabel('frecuencia [Hz]');
157 ylabel('|F(Hz)|');
158 axis([9.36*10^5 9.47*10^5 0 0.06])
159
160
161 figure()
162 subplot(4,1,1);
163 plot(0:1/fs_up:1,modulada3); %Gráfico de la señal modulante en el
164 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
165 title('Señal modulada f_d = 10[kHz]');
166 xlabel('Tiempo [s]');
167 ylabel('Amplitud [V]');
168 axis([0 inf -2 2])
169
170 subplot(4,1,2);
171 plot(0:1/fs_up:1,ruido3_5); %Gráfico de la señal modulante en el
172 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
173 title('Señal modulada f_d = 10[kHz] con ruido SNR_{dB}=5');
174 xlabel('Tiempo [s]');
175 ylabel('Amplitud [V]');
176 axis([0 inf -3.5 3.5])
177
178 subplot(4,1,3);
179 plot(0:1/fs_up:1,ruido3_15); %Gráfico de la señal modulante en el
180 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
181 title('Señal modulada f_d = 10[kHz] con ruido SNR_{dB}=15');
182 xlabel('Tiempo [s]');
183 ylabel('Amplitud [V]');
184 axis([0 inf -3.5 3.5])
185
186 subplot(4,1,4);
187 plot(0:1/fs_up:1,ruido3_30); %Gráfico de la señal modulante en el
188 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
189 title('Señal modulada f_d = 10[kHz] con ruido SNR_{dB}=30');
190 xlabel('Tiempo [s]');
191 ylabel('Amplitud [V]');
192 axis([0 inf -3.5 3.5])
193
194 figure()
195 t=0:dt:1;
196 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
197 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
198 subplot(4,1,1);
199 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
200 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada3)/fs)))
201 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 10[kHz]');
202 xlabel('frecuencia [Hz]');
203 ylabel('|F(Hz)|');
204 axis([9*10^5 9.82*10^5 0 0.026])
205 subplot(4,1,2);
206 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido3_5)/fs)))
```

```
207 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 10[kHz], SNR_{dB}=5');
208 xlabel('frecuencia [Hz]');
209 ylabel('|F(Hz)|');
210 axis([9*10^5 9.82*10^5 0 0.026])
211 subplot(4,1,3);
212 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido3_15)/fs)))
213 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 10[kHz], SNR_{dB}=15');
214 xlabel('frecuencia [Hz]');
215 ylabel(|F(Hz)|');
216 axis([9*10^5 9.82*10^5 0 0.026])
217 subplot(4,1,4);
218 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido3_30)/fs)))
219 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 10[kHz], SNR_{dB}=30');
220 xlabel('frecuencia [Hz]');
221 ylabel(|F(Hz)|');
222 axis([9*10^5 9.82*10^5 0 0.026])
223
224
225
226
227
228 figure()
229 subplot(4,1,1);
230 plot(0:1/fs_up:1,modulada4); %Gráfico de la señal modulante en el
231 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
232 title('Señal modulada f_d = 50[kHz]');
233 xlabel('Tiempo [s]');
234 ylabel('Amplitud [V]');
235 axis([0 inf -2 2])
236
237 subplot(4,1,2);
238 plot(0:1/fs_up:1,ruido4_5); %Gráfico de la señal modulante en el
239 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
240 title('Señal modulada f_d = 50[kHz] con ruido SNR_{dB}=5');
241 xlabel('Tiempo [s]');
242 ylabel('Amplitud [V]');
243 axis([0 inf -3.5 3.5])
244
245 subplot(4,1,3);
246 plot(0:1/fs_up:1,ruido4_15); %Gráfico de la señal modulante en el
247 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
248 title('Señal modulada f_d = 50[kHz] con ruido SNR_{dB}=15');
249 xlabel('Tiempo [s]');
250 ylabel('Amplitud [V]');
251 axis([0 inf -3.5 3.5])
252
253 subplot(4,1,4);
254 plot(0:1/fs_up:1,ruido4_30); %Gráfico de la señal modulante en el
255 % dominio de la frecuencia, con la amplitud normalizada y centrada en 0
256 title('Señal modulada f_d = 50[kHz] con ruido SNR_{dB}=30');
257 xlabel('Tiempo [s]');
```

```
258 ylabel('Amplitud [V]');
259 axis([0 inf -3.5 3.5])
260
261 figure()
262 t=0:dt:1;
263 N=length(t); %Largo del vector de Tiempo.
264 df=1/(N*dt); %Paso de la frecuencia en Hertz.
265 subplot(4,1,1);
266 fshift=(-N/2:N/2-1)*df; %Vector de frecuencias centrado en 0.
267 plot(fshift,fftshift(abs(fft(modulada4)/fs)))
268 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 50[kHz]');
269 xlabel('frecuencia [Hz]');
270 ylabel('|F(Hz)|');
271 axis([7.5*10^5 11.32*10^5 0 0.01])
272 subplot(4,1,2);
273 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido4_5)/fs)))
274 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 50[kHz], SNR_{dB}=5');
275 xlabel('frecuencia [Hz]');
276 ylabel('|F(Hz)|');
277 axis([7.5*10^5 11.32*10^5 0 0.01])
278 subplot(4,1,3);
279 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido4_15)/fs)))
280 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 50[kHz], SNR_{dB}=15');
281 xlabel('frecuencia [Hz]');
282 ylabel(|F(Hz)|');
283 axis([7.5*10^5 11.32*10^5 0 0.01])
284 subplot(4,1,4);
285 plot(fshift,fftshift(abs(fft(ruido4_30)/fs)))
286 title('Señal modulada en el dominio de la frecuencia, f_d = 50[kHz], SNR_{dB}=30');
287 xlabel('frecuencia [Hz]');
288 ylabel(|F(Hz)|');
289 axis([7.5*10^5 11.32*10^5 0 0.01])
```

Con esto además, se obtuvieron los siguientes gráficos en función del tiempo y la frecuencia.

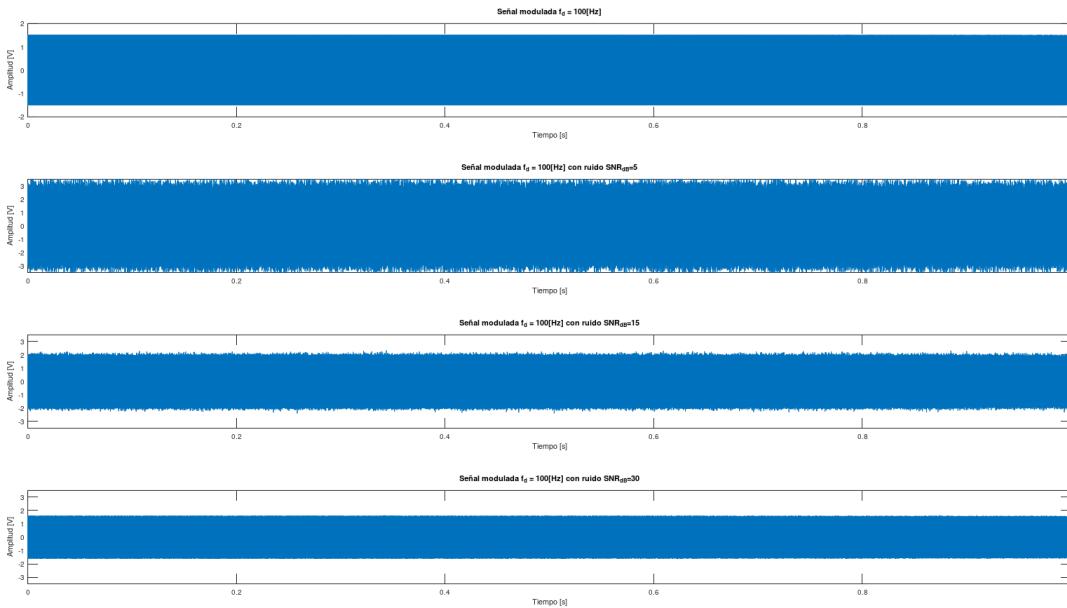


Figura 16: Señal mas ruido en el tiempo para señal de 100Hz

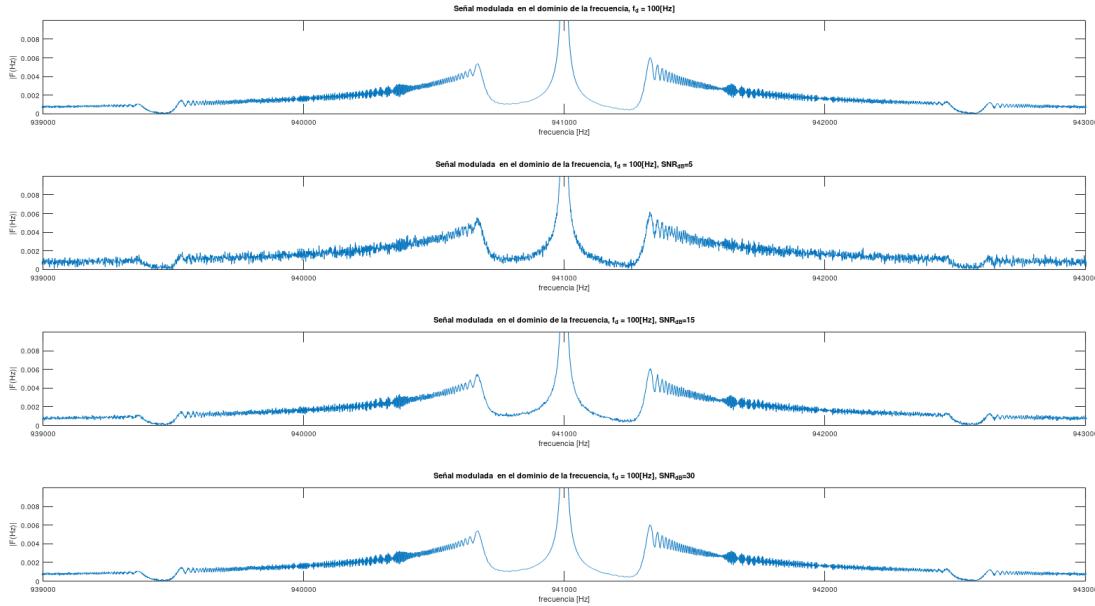


Figura 17: Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 100Hz

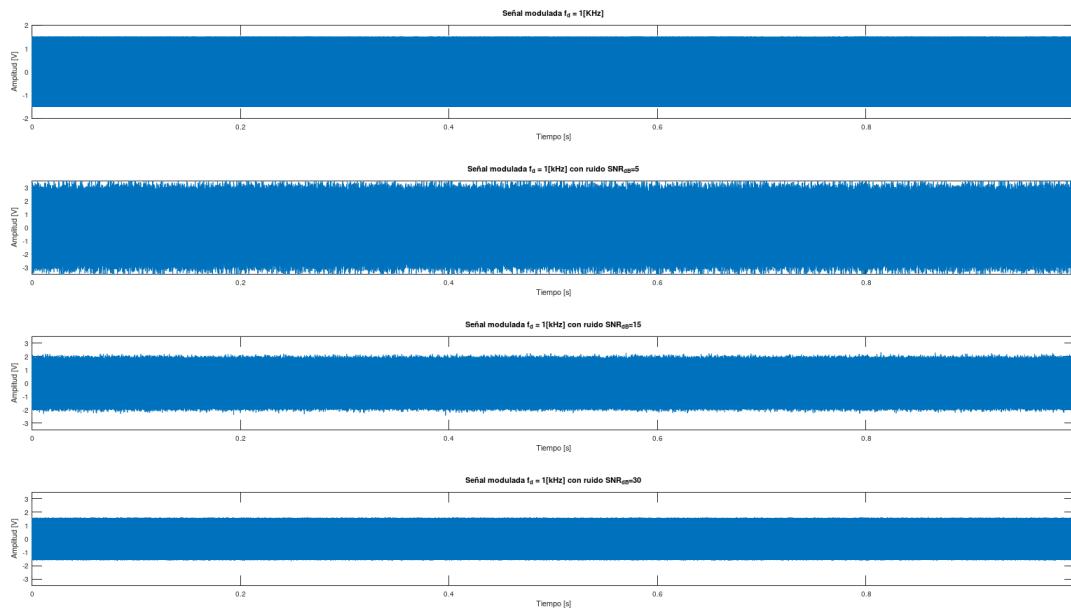


Figura 18: Señal mas ruido en el tiempo para señal de 1KHz

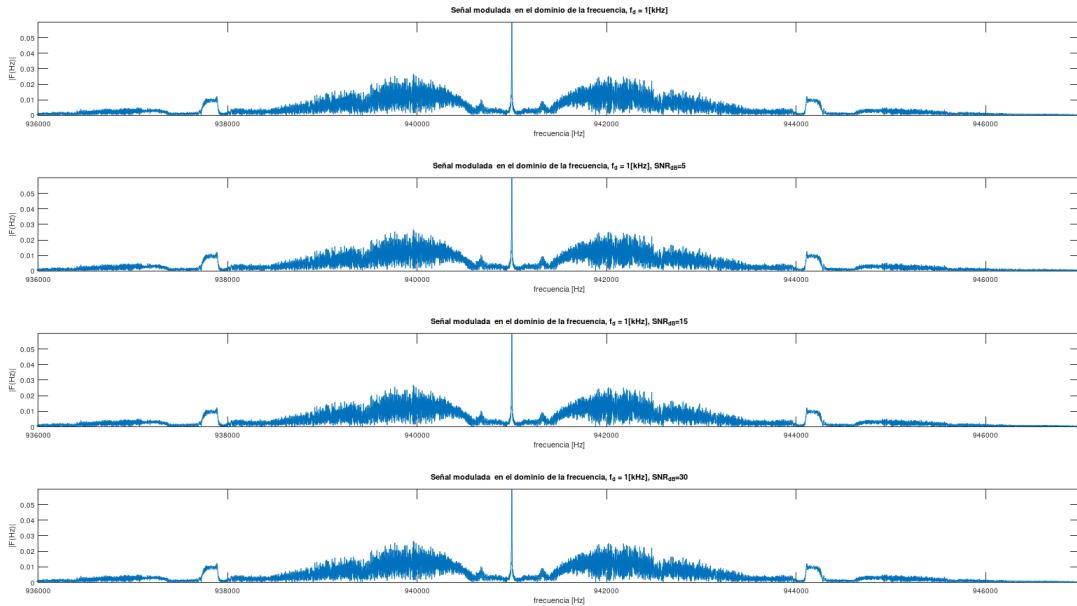


Figura 19: Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 1KHz

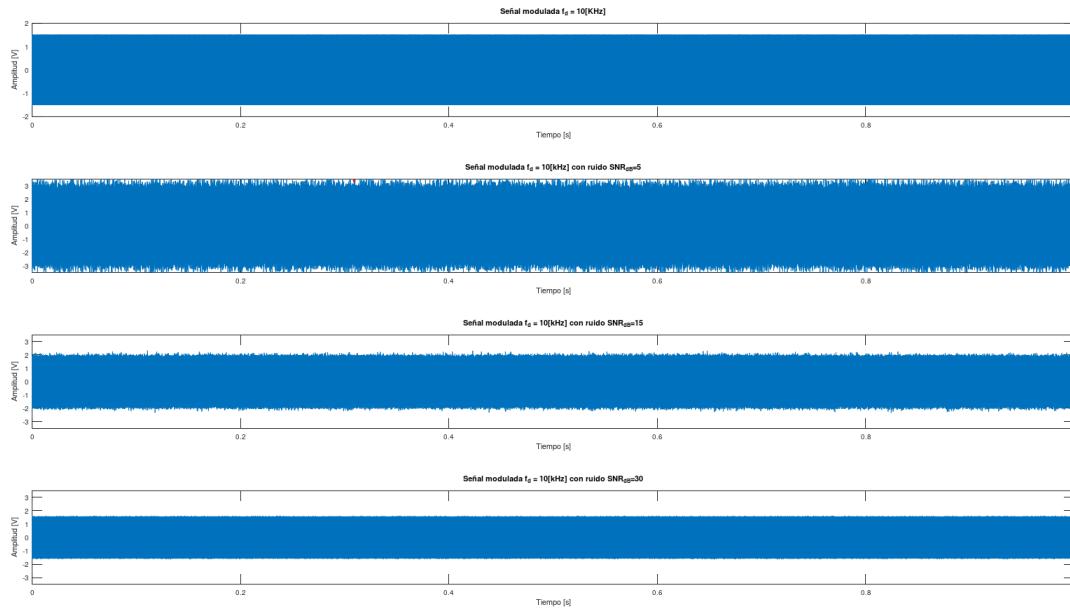


Figura 20: Señal mas ruido en el tiempo para señal de 10KHz

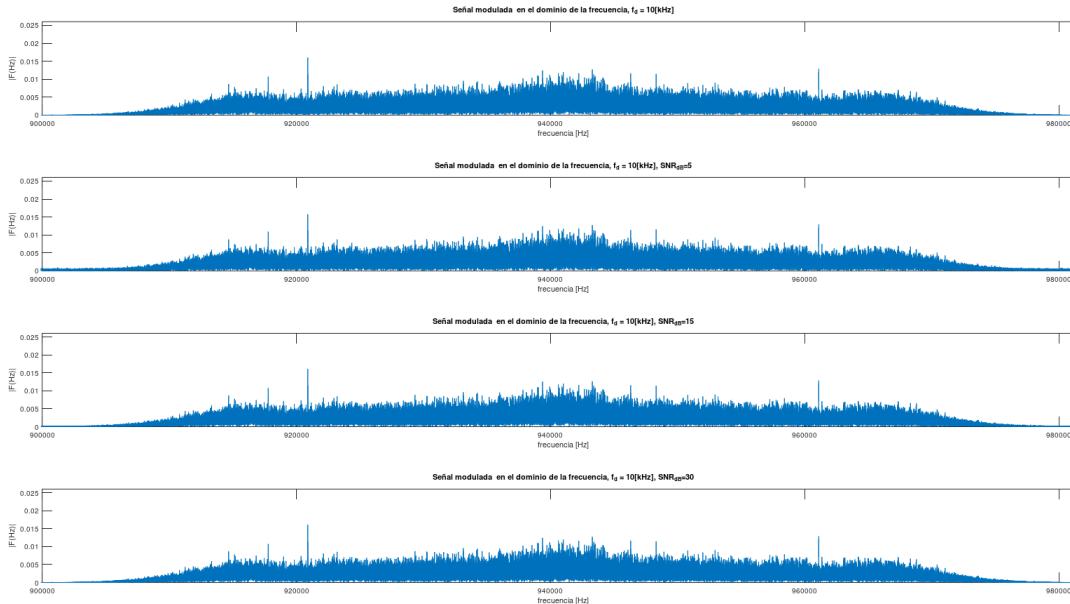


Figura 21: Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 10KHz

Figura 22: Señal mas ruido en el tiempo para señal de 50KHz

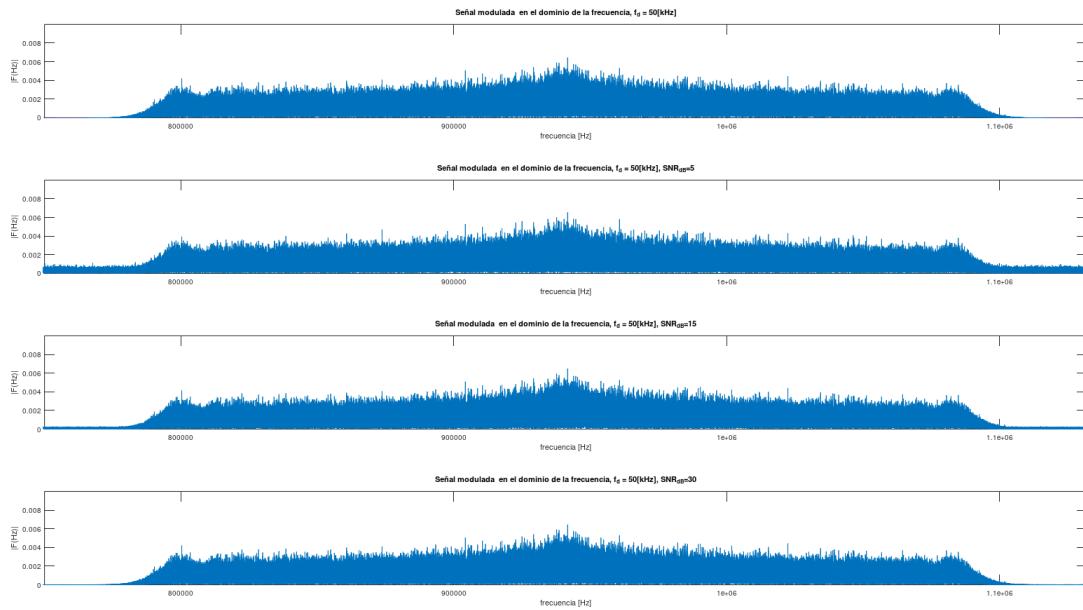


Figura 23: Señal mas ruido en la frecuencia para señal de 50KHz

4.4. Demodulación de la señal

Para realizar la demodulación de la señal, se utiliza la señal en fase y cuadratura, por lo cual a la señal modulada se multiplica por una señal seno con frecuencia de la portadora y por otra parte se multiplica por una señal coseno con la misma frecuencia, para ambas señales resultantes se utiliza un filtro pasabajos, con lo que se tiene la señal en fase y cuadratura.

Una vez obtenidas la fase y cuadratura de la señal se utiliza la relación matemática existente; el arcoctangente de la razón entre cuadratura y fase corresponde a $2 * \pi * f_d] \int m(\tau)$, por lo que derivando se obtiene la señal por un coeficiente.

Código 8: ejemplo de demodulacion de la señal

```

1 %% Parte 4
2 coseno = cos(2*pi*94.1*10^4*t);
3 seno = -1.*sin(2*pi*94.1*10^4*t);
4
5 %% demodulacion señal 1
6 modulacion1_1_cos = modulada1 .* coseno;
7 modulacion1_1_fase = lowpass(modulacion1_1_cos,1000,fs);
8 modulacion1_1_sen = modulada1 .* seno;
9 modulacion1_1_cuadratura = lowpass(modulacion1_1_sen,1000,fs);
10 phi_1_1=atand(modulacion1_1_cuadratura ./ modulacion1_1_fase);
11 phi_1_1= diff(phi_1_1)./(2*pi*100);

```

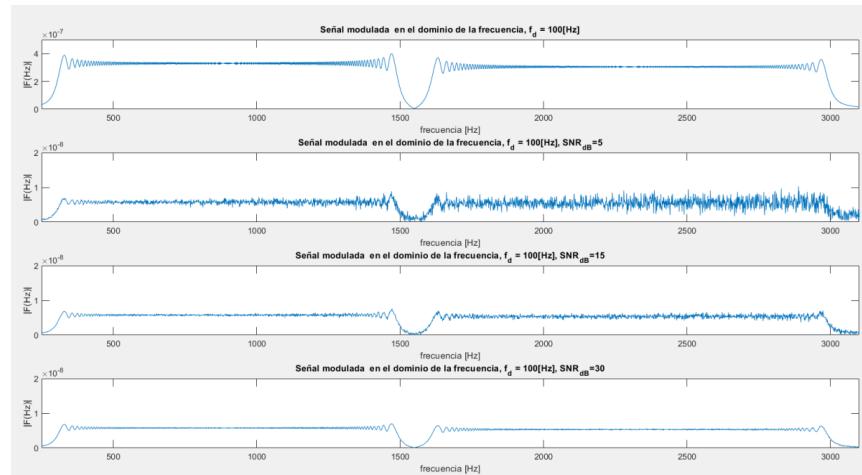


Figura 24: Señal demodulada para 100Hz con distintos SNR

5. Discusión y conclusiones

Gracias al desarrollo de la experiencia se logró un mayor entendimiento de la transmisión FM, cómo implementarla, funcionamiento básico y problemas a enfrentar.

La utilización de transmisión FM permite una comunicación con mayor fidelidad para el receptor, esto debido a que es posible mejorar la resolución de los mensajes mediante diferentes configuraciones de desviación en frecuencia, aunque en la práctica se deben considerar las capacidades de transmisión dentro de las cuales la frecuencia de sampling y el ruido AWGN son factores determinantes.

Referencias

- [1] *Philippe Cattin (2012-04-24). "Image Restoration: Introduction to Signal and Image Processing". MIAC, University of Basel. Retrieved 11 October 2013.*
- [2] *Tudor Barbu (2013). "Variational Image Denoising Approach with Diffusion Porous Media Flow". Abstract and Applied Analysis. 2013: 8. doi:10.1155/2013/856876.*
- [3] *Der, Lawrence. "Frequency Modulation (FM) Tutorial"(PDF). Silicon Laboratories. S2CID 48672999. Archived from the original (PDF) on 3 March 2019. Retrieved 17 October 2019.*
- [4] *A. Michael Noll (2001). Principles of modern communications technology. Artech House. p. 104. ISBN 978-1-58053-284-6.*
- [5] <https://www.gaussianwaves.com/gaussianwaves/wp-content/uploads/2015/06/HowtoGenerateAWGNnoise.pdf>