

## Laboratorio 3: Modulación pasabanda de señales binarias

---

### Sección 2

Camilo Antonio Rios Tenderini—Camilo.rios1@mail.udp.cl

Diego Alexander Hidalgo Gallardo—Diego.hidalgo1@mail.udp.cl

Renato Antonio Yáñez Riveros—Renato.yanez2@mail.udp.cl

Fecha: Junio - 2025

**Profesor Asignado:**  
Marcos Fantoval

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>2</b>
2.1. Construcción de transmisores FSK y OOSK en GNU radio. . . . .	3
2.1.1. Transmisor OOSK . . . . .	3
2.1.2. Transmisor FSK . . . . .	4
2.2. Análisis en MATLAB de modulaciones ASK y FSK . .	4
2.2.1. Modulación FSK . . . . .	4
2.2.2. Modulación ASK (OOK) . . . . .	5
<b>3. Actividad Previa</b>	<b>6</b>
3.1. Ancho de banda de una señal ASK . . . . .	6
3.2. Transmisor OOSK . . . . .	6
3.3. Resultados . . . . .	6
3.3.1. Transmisor OOK . . . . .	6
3.3.2. ASK en MATLAB . . . . .	7
3.4. Análisis . . . . .	7
3.4.1. Transmisor OOSK (GNU radio) . . . . .	7
3.4.2. ASK en MATLAB: Análisis teórico y espectral .	8
<b>4. Actividad 1</b>	<b>8</b>
4.1. Ancho de banda de una señal FSK . . . . .	8
4.2. Envolvente compleja en FSK . . . . .	9
4.3. Transmisor FSK . . . . .	10
4.4. Resultados . . . . .	10
4.4.1. Transmisor FSK . . . . .	10
4.4.2. FSK en MATLAB . . . . .	11
4.5. Análisis . . . . .	11
4.5.1. Transmisor FSK (GNU radio) . . . . .	11
4.5.2. FSK en MATLAB: Análisis teórico y espectral .	11
<b>5. Conclusión</b>	<b>13</b>

# 1. Introducción

En el área de las comunicaciones digitales, la modulación pasabanda de señales binarias constituye una técnica esencial para enviar datos de forma correcta. Este laboratorio tiene como objetivo principal adquirir experiencia práctica en el diseño y análisis de sistemas de comunicación digital mediante técnicas de modulación binaria, como ASK (Amplitude Shift Keying o modulación de amplitud), OOK (On-Off Keying como caso especial de ASK) y FSK (Frequency Shift Keying o modulación de frecuencia).

El trabajo se desglosa en 3 partes: primero, la comprensión teórica de conceptos fundamentales como la envolvente compleja y el espectro de señales moduladas. Segundo, la implementación práctica de transmisores digitales en GNU Radio utilizando señales modulantes en forma de tren de pulsos para representar la señal binaria. Y tercero, el análisis comparativo entre los resultados experimentales y la teoría de la guía de laboratorio y de la preactividad realizada, específicamente en el ancho de banda de las señales moduladas.

De esta forma, se busca mejorar los conocimientos sobre los componentes clave de un sistema de comunicación, así como desarrollar habilidades en el uso de software como GNU Radio o Matlab, que permiten analizar gráficamente el comportamiento de estos sistemas en diversos contextos. Los resultados obtenidos permitirán verificar la validez de los modelos teóricos y analizar los efectos de las técnicas de modulación pasabanda de señales binarias.

## 2. Metodología

En la experiencia, se utilizan distintas técnicas de modulación digital pasa banda para analizar cómo influyen en el comportamiento de la señal resultante que será enviada desde el transmisor al receptor.

Antes de comenzar con las actividades es necesario aclarar algunos conceptos importantes que se utilizan en el laboratorio:

- **Señal de banda base:** Es una señal cuya energía está concentrada cerca de los 0 Hz en el espectro de frecuencias. Generalmente tiene un ancho de banda amplio y representa directamente la información que se desea transmitir, como una señal digital binaria.
- **Señal pasa banda:** Es una señal cuya energía se encuentra centrada en una frecuencia mucho mayor que cero ( $f \gg 0$ ). A diferencia de la señal de banda base, su ancho de banda suele estar más acotado en torno a una frecuencia central. Este tipo de señal es más adecuada para su transmisión por medios físicos (como antenas o cables).
- **Señal moduladora:** Es la señal de banda base que contiene el mensaje o la información a transmitir. En comunicaciones digitales, suele tratarse de una secuencia binaria.
- **Señal portadora:** Es una señal senoidal de alta frecuencia utilizada como base para transportar la señal moduladora. Por sí sola no lleva información, pero su combinación con la moduladora permite que esta última sea transmitida como una señal pasa banda.
- **Modulación:** Es el proceso mediante el cual la señal portadora se modifica en función de la señal moduladora. Esta operación transforma la señal de banda base en una señal pasa banda, lo cual permite transmitirla de forma más eficiente a través de un canal de comunicación.
- **Señal modulada:** Es el resultado del proceso de modulación. Es una señal pasa banda que lleva incorporada la información de la señal moduladora y está lista para ser transmitida.
- **Transformada de Fourier** La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite descomponer una señal o función en sus componentes de frecuencia.

## 2.1. Construcción de transmisores FSK y OOSK en GNU radio.

### 2.1.1. Transmisor OOSK

Para consturir el transmisor OOSK, se utilizó la siguiente configuración en GNU radio.

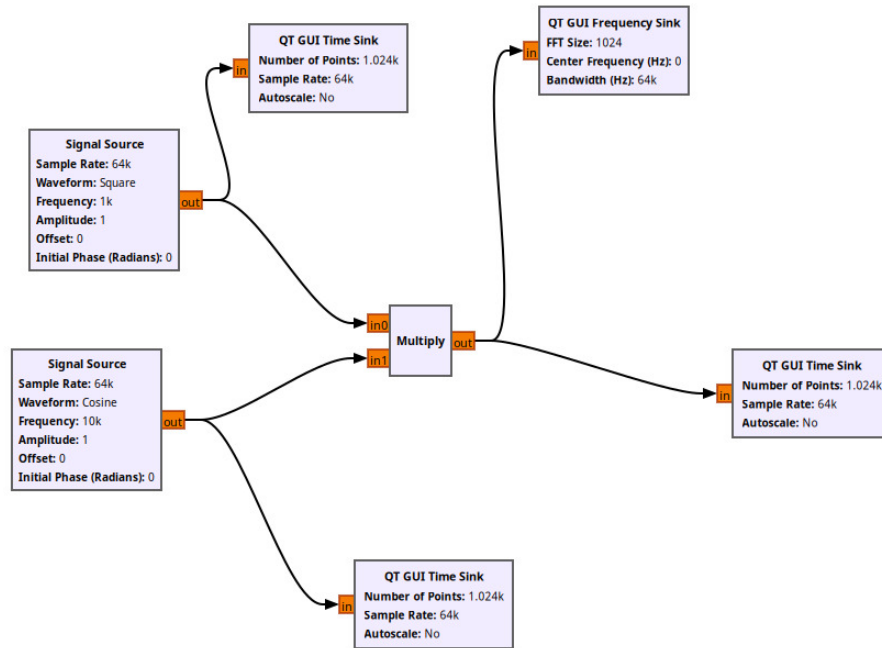


Figura 1: Transmisor OOSK en GNU radio

Para esta parte, se configuró una señal cuadrada de **1kHz** como señal a transmitir, y una portadora de **10kHz**. Para implementar la modulación OOSK (On-Off Shift Keying), se utilizó el bloque **Multiply**, el cual realiza una multiplicación punto a punto entre ambas señales. Esta operación permite que la portadora se transmita únicamente cuando la señal cuadrada está en nivel alto (bit 1), y se anule cuando está en nivel bajo (bit 0), esperando como resultado el efecto característico de encendido apagado de OOSK. Se añaden los respectivos bloques para analizar en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

### 2.1.2. Transmisor FSK

Para construir el transmisor FSK se utilizó la siguiente configuración en GNU radio.

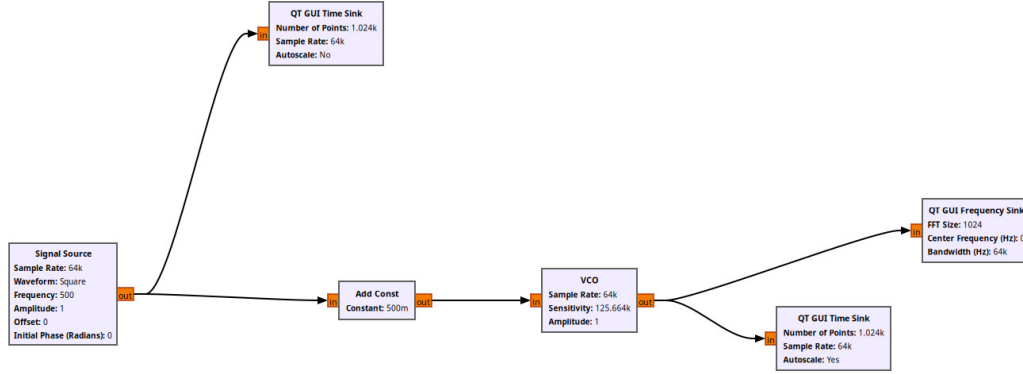


Figura 2: Transmisor FSK en GNU radio.

Como se muestra en la figura, se utilizó una señal mensaje de **500Hz** (onda cuadrada) para facilitar la visualización de los cambios de frecuencia en la modulación. Esta señal se aplicó a un bloque **VCO (Oscilador Controlado por Voltaje)**, configurado con una sensibilidad de  $2\pi \cdot 20000$ , lo que indica cuán rápido cambia la frecuencia de salida del VCO en respuesta a una variación de voltaje en su entrada. En este caso, se obtiene una frecuencia de **10kHz** para el bit 0 y **30kHz** para el bit 1. Finalmente, se conectaron bloques de análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia para observar el comportamiento de la señal modulada.

## 2.2. Análisis en MATLAB de modulaciones ASK y FSK

Además se utilizan archivos de matlab para visualizar las envolventes complejas de las modulaciones tanto ASK como FSK.

### 2.2.1. Modulación FSK

Se simuló una señal FSK usando una secuencia binaria, construyendo su envolvente compleja  $g(t) = A \cdot e^{j2\pi\Delta f \int m(\tau)d\tau}$ , donde  $\Delta f = \frac{f_2 - f_1}{2}$  y  $m(t)$  representa la señal binaria transformada en niveles  $-1$  y  $+1$ . Se graficaron tanto la envolvente como su transformada de Fourier. El ancho de banda teórico se calculó con:

$$BW_{FSK} = |f_2 - f_1| + 2R_s$$

### 2.2.2. Modulación ASK (OOK)

Para ASK, se consideró una señal binaria unipolar  $m(t)$  multiplicada por una portadora. La envolvente compleja se definió como  $g(t) = A \cdot m(t)$ , y la señal modulada como  $s(t) = A \cdot m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$ . También se graficó su transformada de Fourier para estimar el ancho de banda.

Los códigos utilizados en esta experiencia se encuentran en el siguiente repositorio de GitHub: Repositorio del laboratorio en GitHub.

### 3. Actividad Previa

#### 3.1. Ancho de banda de una señal ASK

En la modulación ASK, la ecuación que representa el ancho de banda de la señal modulada es la siguiente:

$$B = 2R_b$$

donde  $R_b$  es la tasa de bits por segundo (Similar a la modulación AM).

En el caso de la modulación OOK, que es un caso especial de ASK en que el índice de modulación es 1, el bit 0 representa la ausencia de señal y el ancho de banda teórico se reduce aproximadamente a:

$$B \approx R_b$$

Esto se debe a que en OOK las transiciones entre símbolos ocurren con menor frecuencia, lo que provoca una señal con menor ancho de banda (porque no transmite los 0), eliminando el factor 2 presente en la ASK convencional.

#### 3.2. Transmisor OOSK

Se compila el transmisor OOSK explicado en el punto 2.1.1 para la preactividad.

#### 3.3. Resultados

A continuación se mostrarán los gráficos obtenidos dentro de la actividad previa:

##### 3.3.1. Transmisor OOK

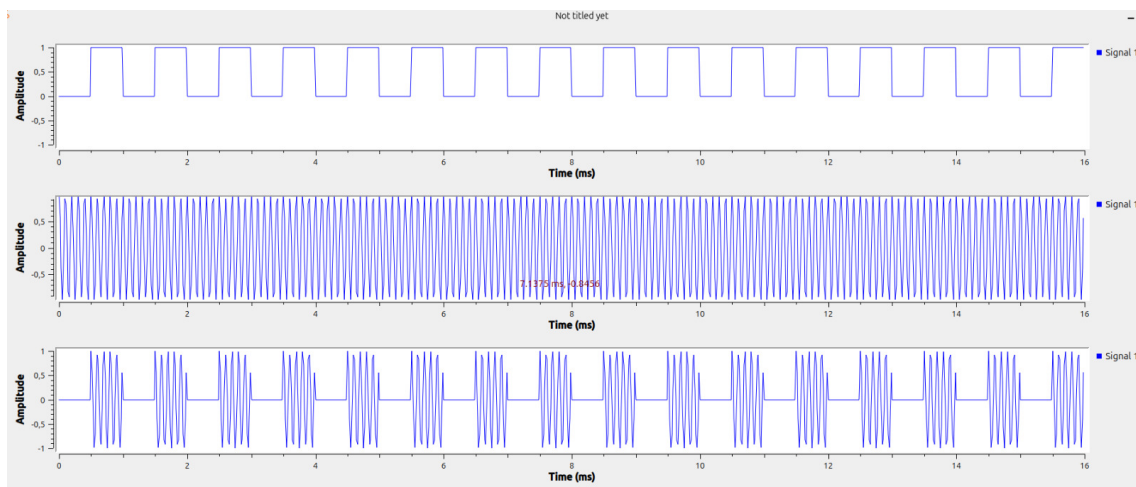


Figura 3: Gráfica generada a partir de la compilación de la actividad previa



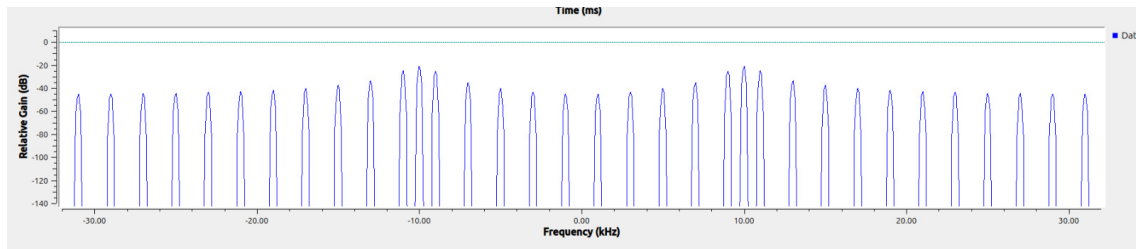


Figura 4: Grafica generada a partir de la compilación de la actividad previa.

### 3.3.2. ASK en MATLAB

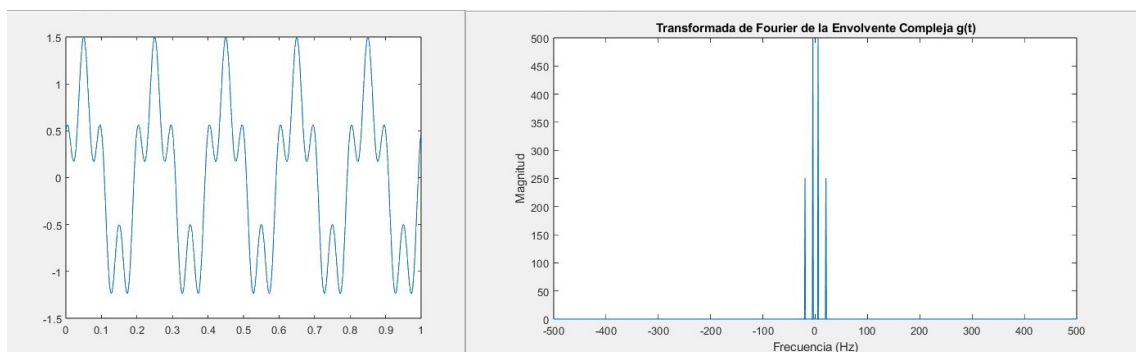


Figura 5: Grafica ASK a partir de la compilación en MATLAB.

A continuación, se detallan los gráficos presentados anteriormente en la figura 4, de arriba hacia abajo:

1. **Tren de pulsos:** Señal binaria a transmitir
2. **Señal moduladora:** Señal portadora antes de aplicar la modulación OOSK.
3. **Señal modulada OOSK:** Resultado de multiplicar el tren de pulsos por la portadora..
4. **Transformada de Fourier de la señal OOSK:** Representación espectral de la señal modulada.

## 3.4. Análisis

### 3.4.1. Transmisor OOSK (GNU radio)

Gráficamente se logra apreciar el proceso de modulación OOSK sobre el mensaje compuesto por un tren de pulsos periódico. En la figura 1, se observa como la señal portadora se mantiene encendida durante los periodos en el cual el tren de impulso

está en 1, y como la portadora desaparece cuando el tren de impulso está en 0, cumpliendo de manera precisa con la definición de On-Off Shift Keying.

Ahora, desde el punto de vista de la frecuencia (figura 2) se observan componentes espectrales centrados en la frecuencia de la señal portadora (10khz), lo que es coherente ya que esta es de alta energía y toma presencia en el dominio de la frecuencia. Se destaca también la presencia de componentes laterales que son parte de la naturaleza del tren de pulsos, que hacen que se espacien en medida de su frecuencia (1khz).

### 3.4.2. ASK en MATLAB: Análisis teórico y espectral

Para la figura 5, se puede observar en la gráfica del panel izquierdo, la naturaleza de la modulación OOK: la señal portadora se transmite únicamente cuando el bit es 1, mientras que se .apaga cuando el bit es 0. Esto genera un tren de senoidales interrumpido, en el que cada tramo de onda corresponde directamente a un bit de la secuencia de entrada.

El espectro del panel derecho revela un contenido frecuencial centrado en la frecuencia portadora  $f_c$ , acompañado de lóbulos laterales producto de los cambios abruptos de amplitud. En ASK el encendido y apagado repentino de la portadora introduce componentes de alta frecuencia que dispersan la energía en el espectro. Esta mayor dispersión espectral indica una menor eficiencia espectral y una mayor sensibilidad al ruido, especialmente si se transmite en un canal limitado o con interferencias.

## 4. Actividad 1

### 4.1. Ancho de banda de una señal FSK

El ancho de banda teórico de una señal modulada por *Frequency Shift Keying* (FSK) se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\text{Ancho de banda (BW)} = \Delta f + 2B$$

Donde:

- $\Delta f = |f_1 - f_2|$  es la diferencia entre las frecuencias de marca (1 binario) y espacio (0 binario).
- $B$  es el ancho de banda de la señal moduladora (tren de pulsos).

Alternativamente, para FSK binario, el ancho de banda de la señal modulada puede expresarse como:

$$BW \approx 2(\Delta f + R_b)$$

Donde  $R_b$  es la tasa de bits (es decir,  $R_b = \frac{1}{T_b}$ , donde  $T_b$  es el período de bit).

## 4.2. Envolverte compleja en FSK

La señal modulada en frecuencia para FSK puede representarse como:

$$v(t) = \Re \{g(t) \cdot e^{j\omega_c t}\}$$

donde:

- $v(t)$  es la señal modulada (banda pasante),
- $g(t)$  es la envolvente compleja en banda base,
- $\omega_c = 2\pi f_c$  es la frecuencia angular de la portadora.

En una modulación FSK binaria, se transmiten dos frecuencias diferentes dependiendo del bit:

$$v(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t), & \text{si } m(t) = 1 \\ \cos(2\pi f_2 t), & \text{si } m(t) = 0 \end{cases}$$

Suponiendo que  $f_1 = f_c + \Delta f$  y  $f_2 = f_c - \Delta f$ , podemos escribir:

$$v(t) = \begin{cases} \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t), & m(t) = 1 \\ \cos(2\pi(f_c - \Delta f)t), & m(t) = 0 \end{cases}$$

Utilizando la identidad del coseno como parte real de una exponencial compleja:

$$v(t) = \Re \{e^{j2\pi f_c t} \cdot e^{\pm j2\pi \Delta f t}\} = \Re \{g(t) \cdot e^{j\omega_c t}\}$$

Por lo tanto, la envolvente compleja  $g(t)$  es:

$$g(t) = \begin{cases} e^{j2\pi \Delta f t}, & m(t) = 1 \\ e^{-j2\pi \Delta f t}, & m(t) = 0 \end{cases}$$

O, de forma compacta:

$$g(t) = e^{j2\pi \Delta f t \cdot (2m(t) - 1)}$$

donde  $m(t) \in \{0, 1\}$  representa el mensaje digital binario.

### 4.3. Transmisor FSK

Se compila el transmisor FSK explicado en el apartado 2.1.2

### 4.4. Resultados

#### 4.4.1. Transmisor FSK

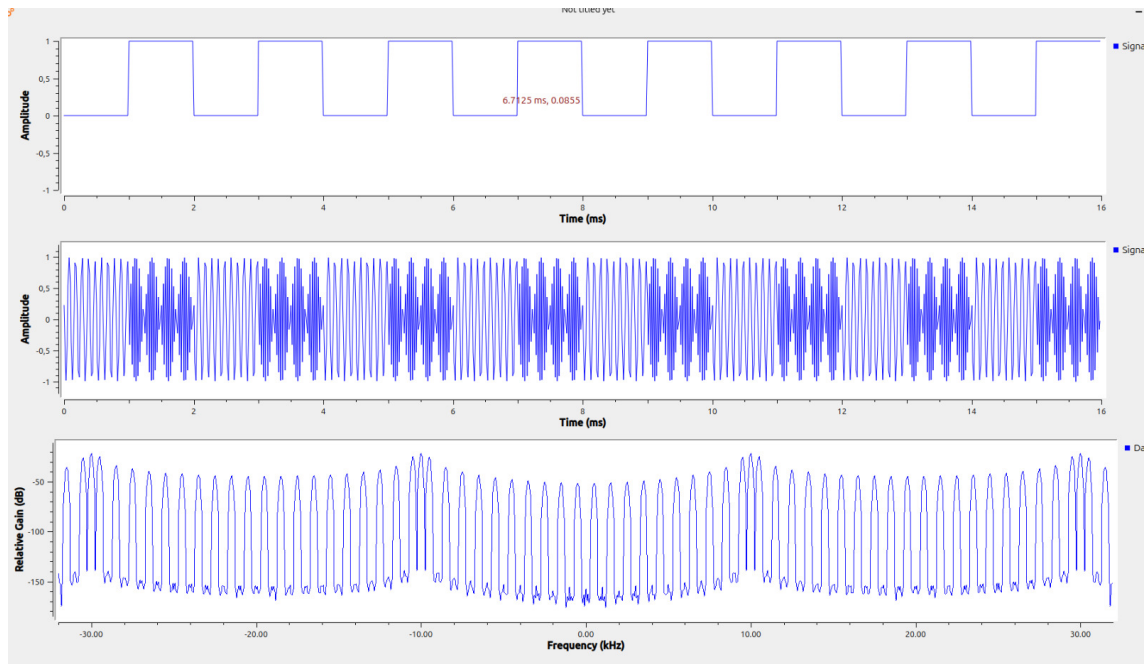


Figura 6: Compilado de FSK en gnu radio.

En la Figura 7, de arriba hacia abajo, se observa:

1. **Tren de pulsos:** Señal binaria a transmitir.
2. **Señal modulada FSK:** Resultado de aplicar modulación por desplazamiento en frecuencia al tren de pulsos.
3. **Transformada de Fourier de la señal FSK:** Representación espectral de la señal modulada.

#### 4.4.2. FSK en MATLAB

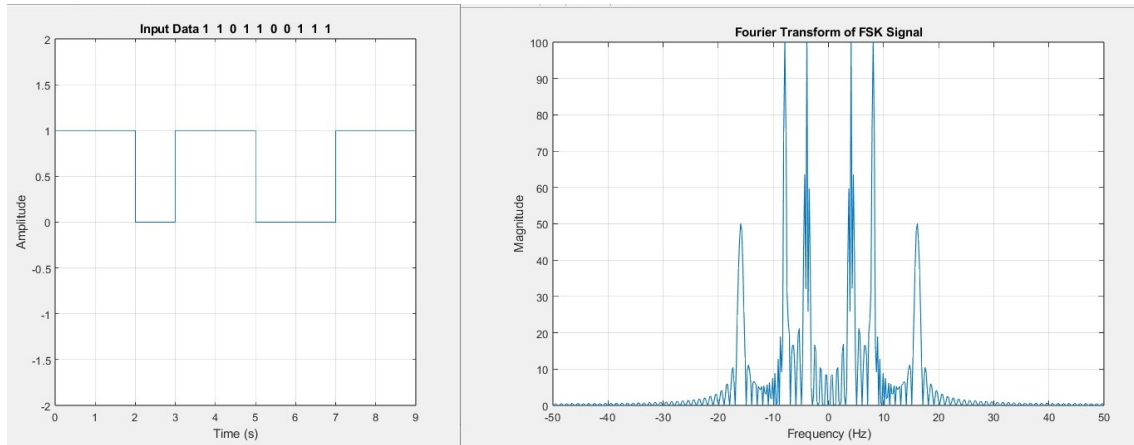


Figura 7: Grafica FSK a partir de la compilación en MATLAB

### 4.5. Análisis

#### 4.5.1. Transmisor FSK (GNU radio)

Se logra apreciar en la figura 3 una correcta implementación de un transmisor FSK. Esto, debido a que en el segundo gráfico, se aprecia como al momento de que el mensaje original (tren de pulsos) se encuentra en 0, la señal modulada mantiene una frecuencia mas baja, y cuando la señal mensaje se encuentra en un 1, la modulada tiene una frecuencia mas alta. Como se explicó anteriormente, se está transmitiendo a una frecuencia de 30khz cuando el mensaje envía un 1, y 10khz con fase invertida cuando el mensaje envía 0.

En el tercer gráfico se muestra la transformada de Fourier de la señal FSK. Es decir, su representación en el dominio de la frecuencia. Se pueden observar claramente dos picos principales, los cuales corresponden a las frecuencias utilizadas para representar los bits 0 y 1 ( $f_2$  y  $f_1$ ). Esto confirma que la modulación genera dos componentes espectrales separadas, como se espera en un sistema FSK binario. Además, la separación entre estos picos permite identificar el valor de  $\Delta f$  y comparar con el ancho de banda teórico de la señal modulada.

#### 4.5.2. FSK en MATLAB: Análisis teórico y espectral

Para la figura 7, Se puede observar en el panel izquierdo cómo la forma de la señal cambia de frecuencia en función del patrón binario. Esto se evidencia en los tramos con mayor o menor densidad de oscilaciones, reflejando el uso de distintas frecuencias (e.g.,  $f_1$ ,  $f_2$ , etc.).

En el dominio de la frecuencia del panel derecho, la Transformada de Fourier muestra

picos claramente definidos en torno a las frecuencias utilizadas en la modulación, validando el principio fundamental del FSK: asignar distintas frecuencias a diferentes bits o combinaciones de bits. La simetría del espectro confirma que se trata de una señal real. Esta visualización permite comprobar que el ancho de banda ocupado está en concordancia con el estimado teórico, y que la modulación FSK es robusta frente al ruido por su separación en frecuencia.

## 5. Conclusión

En conclusión, este laboratorio permitió implementar de forma práctica las técnicas de modulación pasabanda binaria: OOK, ASK y FSK. Esto se logró mediante la construcción de transmisores digitales en GNU Radio y el análisis de sus señales en los dominios del tiempo y la frecuencia.

Durante la actividad previa, se trabajó con la modulación OOK, un caso particular de ASK binaria. Se utilizó la ecuación  $B \approx R_b$  para estimar su ancho de banda, verificando que la señal resultante presentó un espectro más acotado que en ASK convencional, al no transmitir portadora durante los bits 0. También se analizó su envolvente compleja  $g(t)$  y su transformada de Fourier, observando un espectro centrado en la frecuencia portadora, con componentes laterales propias del tren de pulsos.

En la modulación FSK, se observó que la frecuencia de la señal varía según el bit transmitido: más baja para 0 y más alta para 1. Esta variación fue clara en la forma de onda y su espectro, donde se identificaron dos componentes principales, confirmando la separación entre  $f_1$  y  $f_2$  definida por  $\Delta f$ .

Finalmente, se comprobó que el ancho de banda de FSK corresponde con la expresión teórica  $BW \approx 2(\Delta f + R_b)$ , y que la envolvente compleja facilitó la comprensión del comportamiento espectral de las señales moduladas.

## Referencias

- [1] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Signals and Systems*, 2nd ed., Prentice-Hall, 1996.
- [2] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, 4th ed., Prentice-Hall, 2006.