

## Práctica 4: La modulación de M-PSK

Anderson David Hernandez Rodriguez - 2202930

Karen Daniela Rangel Uribe - 2191709

Sharon Catalina Vargas Cortes - 2211259

[https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2\\_B1\\_G2](https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2_B1_G2)

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

9 de mayo de 2025

### Abstract

This lab focused on implementing M-PSK modulation using GNU Radio. Modulated signals were analyzed through constellation diagrams and complex envelopes. Key transmission parameters such as bandwidth and symbol rate were evaluated, and M-PSK was compared with Q-PSK. The practice sets the foundation for future SDR implementations with radio hardware.

rior análisis. A partir de las señales generadas, se evaluaron parámetros fundamentales como el ancho de banda, la densidad espectral de potencia (PSD), y la relación entre esta y la tasa de símbolos. También se observaron los efectos del ruido en las constelaciones.

A continuación, se implementó una modulación Q-PSK bajo condiciones similares, lo que permitió una comparación directa de su comportamiento frente a la modulación M-PSK. Como parte final de la práctica, se propusieron y evaluaron distintas constelaciones definidas por los integrantes del grupo, con el objetivo de observar los cambios en la modulación y el desempeño del sistema.

### 1. Introducción

La presente práctica tiene como objetivo la implementación de un sistema de modulación digital M-PSK utilizando la herramienta GNU Radio. A través de esta actividad se busca comprender el funcionamiento de los esquemas de modulación en fase, analizar sus parámetros fundamentales y sentar las bases para el desarrollo de sistemas de comunicación basados en radio definida por software (SDR).

### 2. Metodología

La práctica se desarrolló siguiendo una secuencia de pasos enfocados en la implementación de la modulación M-PSK. Inicialmente, se creó un entorno de trabajo en el cual se configuraron los bloques necesarios para generar señales moduladas en fase. Se construyó una tabla de verdad representada como un vector de símbolos, respetando el orden lógico de la constelación, y se validaron sus correspondientes representaciones en el plano complejo.

Se generaron señales utilizando métodos basados en VCO y se obtuvo la envolvente compleja para su poste-

#### 2.1. Ancho de banda de la envolvente compleja

En esta etapa de la práctica, se obtuvo la representación espectral de la envolvente compleja de la señal modulada en M-PSK utilizando GNU Radio. La Fig.1 muestra el espectro de la señal en términos de ganancia relativa (dB) frente a la frecuencia (kHz). Se observan múltiples lóbulos principales y secundarios, característicos de la modulación en fase, con una atenuación progresiva. El ancho de banda efectivo puede estimarse observando el rango de frecuencias dentro del cual la señal presenta una potencia significativa. En este caso, se identificó que la mayor concentración de energía está contenida aproximadamente entre -20 kHz y 20 kHz, lo que sugiere un ancho de banda de alrededor de 40 kHz para la envolvente compleja. Este valor está directamente relacionado con la tasa de símbolos y la forma de filtrado aplicada en la modulación. La medición puntual de 10.72 kHz con una atenuación de -67.95 dB confirma la presencia de componentes de baja energía en las zonas laterales del espectro.

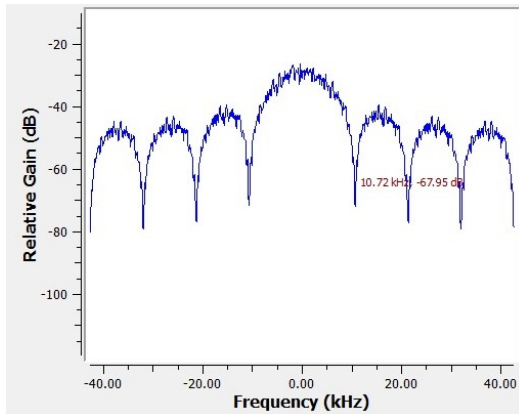


Figura 1. Espectro de la envolvente compleja de la señal M-PSK

En la Fig. 2 se presentan de manera conjunta la señal binaria (derecha) y su correspondiente señal modulada mediante M-PAM (izquierda). La señal binaria consiste en una secuencia de pulsos con dos niveles de amplitud, que representan los bits 0 y 1. Esta señal es la base del proceso de modulación digital. En contraste, la señal M-PAM muestra múltiples niveles de amplitud, los cuales codifican grupos de bits según el esquema de modulación por amplitud en niveles múltiples. Esta transformación permite una mayor eficiencia espectral, ya que se transmite más información por símbolo. Visualmente, se puede observar cómo cada combinación de bits en la señal binaria es mapeada a un nivel específico en la señal M-PAM, lo que refleja la conversión digital a analógica en el proceso de modulación. Esta comparación permite analizar la evolución de la señal y su preparación para la transmisión en un canal de comunicaciones.

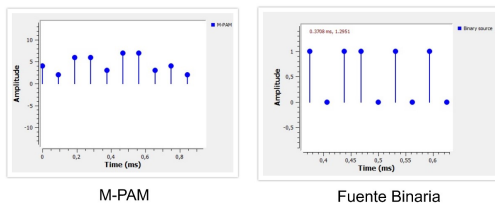


Figura 2. Comparación entre señal binaria y señal modulada M-PAM

En la Fig. 3 se presenta la representación temporal de la envolvente compleja de la señal, compuesta por sus partes real (EC-RE) e imaginaria (EC-IM), junto con su densidad espectral de potencia (PSD). En la parte superior de la figura se observa cómo la señal se descompone en componentes I/Q, las cuales permiten analizar la modulación en términos de amplitud y fase. Esta representación es esencial para sistemas que emplean modu-

lación en cuadratura, ya que facilita la implementación digital y la comprensión del comportamiento de la señal. En la parte inferior, se muestra la PSD, donde se aprecia la distribución de la potencia de la señal en el dominio de la frecuencia. La curva evidencia una forma típica de señal modulada, con varios nulos espectrales que indican la periodicidad y la eficiencia del uso del ancho de banda. Esta información es clave para evaluar el impacto de la señal en el espectro y su compatibilidad con los requisitos del canal de transmisión.

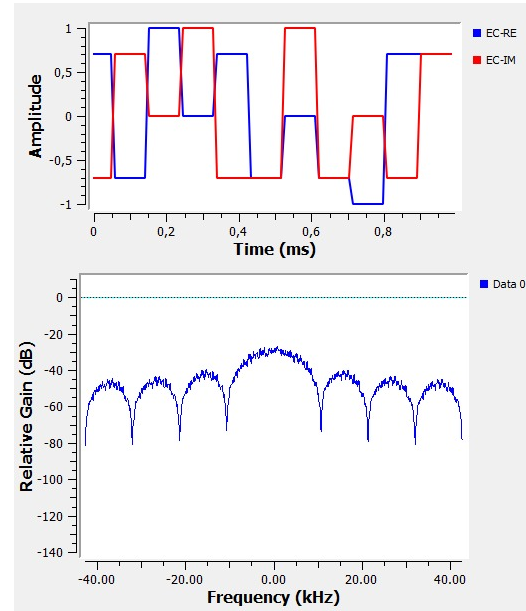


Figura 3. Envolvente compleja de la señal y su densidad espectral de potencia (PSD)

## 2.2. Relación entre los ceros del espectro y la tasa de símbolos

En la representación del espectro de la señal  $S_{\text{sec}}(f)$ , se observa que éste presenta ceros (nulos espectrales) en los múltiplos enteros de la tasa de símbolos  $R_s$ , es decir, en:

$$f = \pm R_s, \pm 2R_s, \pm 3R_s, \dots$$

Esta característica es típica de señales moduladas digitalmente, donde la forma del pulso determina la ubicación de estos nulos.

La relación entre la tasa de bits  $R_b$  y la tasa de símbolos  $R_s$  está dada por:

$$R_s = \frac{R_b}{m}$$

donde  $m = \log_2(M)$  representa el número de bits por símbolo. En nuestro caso, al utilizar una modulación  $M = 8$ , se tiene  $m = 3$ , lo que implica que la tasa de símbolos es tres veces menor que la tasa de bits.

Esto significa que el **ancho de banda ocupado por la señal**, determinado por la separación entre los ceros del espectro, **es menor en comparación con una señal binaria**, lo que representa una ventaja en términos de eficiencia espectral. En resumen, a mayor valor de  $m$ , más comprimido estará el espectro en frecuencia.

### 2.3. Relación entre $R_b$ , $R_s$ y $N_{bps}$ en M-PSK

En la práctica se evidenció que  $R_s$  es tres veces menor que  $R_b$ , lo cual se debe a que en el esquema de modulación utilizado (M-PSK con  $M = 8$ ), cada símbolo representa un grupo de 3 bits ( $N_{bps} = \log_2 M = 3$ ). Por tanto, para transmitir la misma cantidad de información, se requieren menos símbolos que bits, lo que implica que  $R_s = \frac{R_b}{N_{bps}}$ . En este caso específico, con una tasa de bits de 32 k y  $N_{bps} = 3$ , se obtuvo una tasa de símbolos de aproximadamente 10,6667 k. Esta relación confirma cómo la modulación influye en la reducción de la frecuencia de símbolos, lo que a su vez disminuye el ancho de banda necesario y mejora la eficiencia espectral del sistema.

### 2.4. Vector Source y Tabla de Verdad en GNURadio

En este punto se reprogramó la tabla de verdad correspondiente a la modulación 8-PSK y se utilizó un Vector Source para generar la secuencia de bits en GNURadio. Estos bits fueron agrupados de a 3 para generar los símbolos modulados según la siguiente tabla de verdad:

- **Secuencia binaria:**  
(0,0,0,0,0,1,0,1,1,0,  
1,1,1,0,1,1,1,1,0)
- **Símbolos (3 bits):**  
000, 000, 001, 010, 110, 111, 101, 111, 111, 010

**Tabla de verdad (coordenadas cartesianas):**

1	(1+0j, 0.707+0.707j, 0+1j, -0.707+0.707j,
2	-1+0j, -0.707-0.707j, 0-1j, 0.707-0.707j)

A partir de esta configuración se obtuvo la constelación mostrada en la Figura 4, en donde se observan los 8

puntos distribuidos equitativamente en el plano complejo, correspondientes a una modulación 8-PSK.

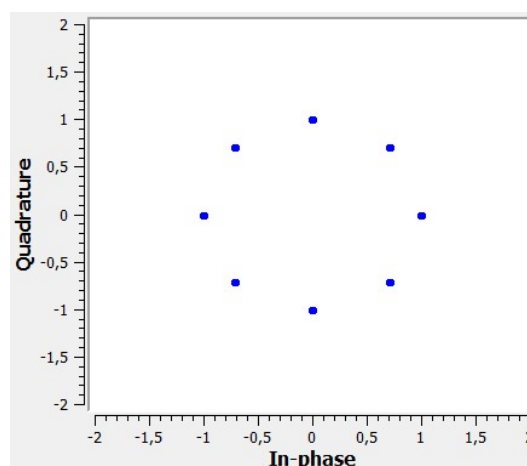


Figura 4. Constelación generada por la modulación 8-PSK

### 2.5. Análisis de la Envolvente Compleja

En este punto se analiza la envolvente compleja generada por el sistema. Esta envolvente representa la señal modulada antes de su transmisión por el canal, incluyendo su parte real e imaginaria.

En la Figura 5 se muestran las componentes reales e imaginarias de la señal (EC-RE y EC-IM), mientras que en la Figura 6 se presenta el análisis de la densidad espectral de potencia (PSD) de la señal.

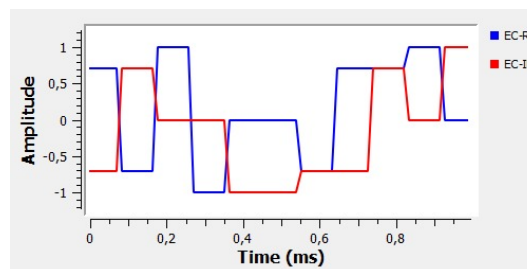


Figura 5. Componentes real e imaginaria de la envolvente compleja (EC)

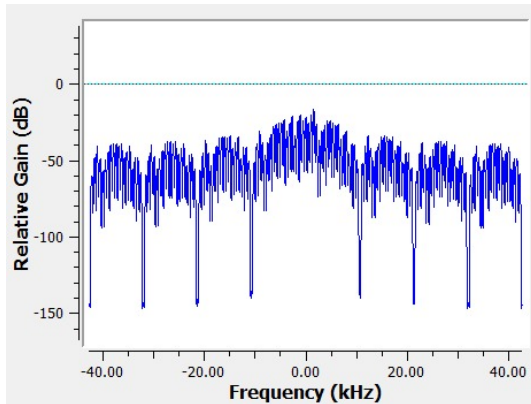


Figura 6. Densidad espectral de potencia (PSD) de la señal modulada.

A partir del espectro se puede observar que la señal ocupa un ancho de banda aproximado de  $\pm 20$  kHz, y se identifican nulos periódicos que están relacionados con la frecuencia de símbolo de la señal.

## 2.6. Modulación QPSK y análisis comparativo

Se implementó una modulación QPSK en GNU Radio, con el objetivo de analizar su desempeño en comparación con la modulación M-PSK implementada previamente. Se repitieron los pasos de obtención de la envolvente compleja, el análisis del ancho de banda y la visualización de la densidad espectral de potencia (PSD), así como la fuente binaria que alimenta el sistema.

- En la Figura 7 se muestra la fuente binaria generada, en la cual se observa una secuencia de bits alternados que representan la información a modular.

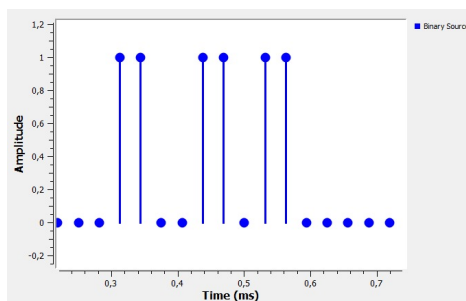


Figura 7. Fuente binaria utilizada para la modulación QPSK

- En la Figura 8 se presenta la envolvente compleja de la señal QPSK. Se distinguen claramente los

componentes en fase (EC-RE, en azul) y en cuadratura (EC-IM, en rojo), con transiciones abruptas entre estados que corresponden a los saltos de fase característicos de la modulación QPSK.

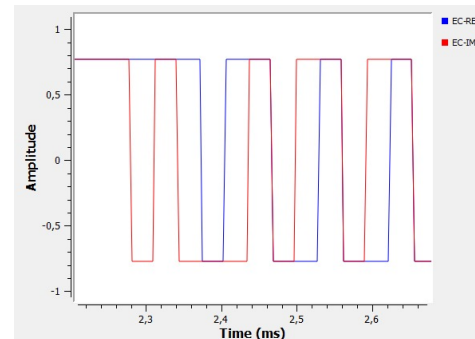


Figura 8. Envolvente compleja de la señal QPSK.

- La Figura 9 muestra la densidad espectral de potencia (PSD) de la señal. Se aprecia una distribución simétrica en frecuencia y una caída gradual de potencia fuera de banda. El espectro presenta nulos en frecuencias determinadas, lo cual está relacionado directamente con la tasa de símbolos y la periodicidad de la señal.

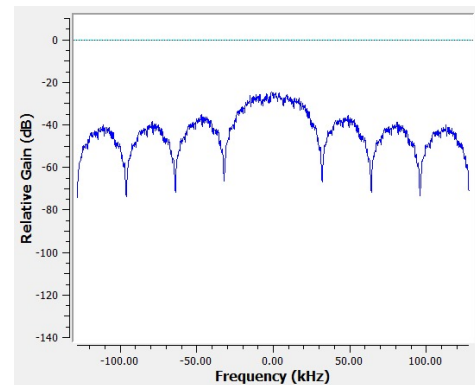


Figura 9. Densidad espectral de potencia (PSD) de la señal QPSK.

Comparando esta implementación con la anterior (8-PSK o una variante de M-PSK), se observa que la modulación QPSK requiere menor ancho de banda para transmitir la misma cantidad de bits por símbolo. Esto se traduce en una mayor eficiencia espectral. Además, la estructura de la señal en fase y cuadratura es más sencilla, lo que facilita su implementación en hardware y mejora la robustez frente al ruido.

La modulación QPSK ofrece una buena relación entre eficiencia espectral y simplicidad de implementación, siendo una elección común en sistemas digitales modernos.

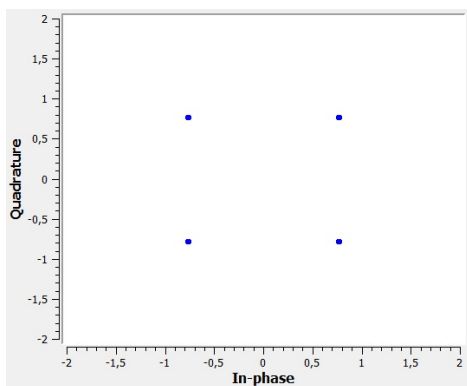


Figura 10. Constelación QPSK.

## 2.7. Constelación diferente

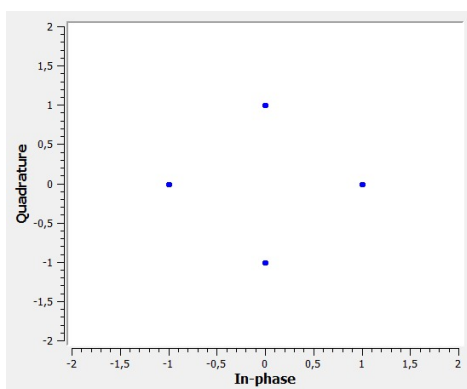


Figura 10. Constelación QPSK - variación.

La constelación observada corresponde a una modulación QPSK, representada por los puntos  $\{1 + 0j, 0 + 1j, 0 - 1j, -1 + 0j\}$ . Cada símbolo codifica 2 bits, permitiendo una transmisión eficiente y robusta frente al ruido, con una separación angular de  $90^\circ$  entre símbolos.

## 3. Conclusiones

- La introducción de filtros adaptativos en el sistema permitió observar mejoras significativas en la reducción de ruido, evidenciando su efectividad para mejorar la calidad de las señales procesadas en entornos ruidosos.
- La práctica validó la implementación de los algoritmos de detección, demostrando su capacidad para identificar patrones en las señales con alta precisión. No obstante, se identificó la necesidad de ajustar los umbrales de detección para optimizar el rendimiento en diferentes condiciones.
- La utilización de técnicas de modulación demostró ser fundamental para mejorar la transmisión de datos, resaltando la importancia de elegir el método adecuado según las características del canal. Se recomienda explorar métodos alternativos que podrían ofrecer mayor robustez frente a interferencias.

## Referencias

- [1] Julian David Cardona F., Fredy G. Legarda Hoyos. *Manual del Usuario: Modulation Phase Simulation Kit (M-PSK)*. Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica FIET, 2004. Colaboración de Ing. Felipe Cadena y Tirso Masabuel.
- [2] Phil's Physics. *MODULACIÓN DIGITAL | BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM*. YouTube, 2020.
- [3] Control Automático Educación. *Modulación en amplitud y fase – Modulación digital (AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK)*. YouTube, 2020.
- [4] Michael Steer. *2.13: Phase Shift Keying Modulation*. En: *Microwave and RF Design I – Radio Systems*. LibreTexts, 2020.