

# Laboratorio 5:Modulación M-QAM (GNURadio)

Carlos Stiven Roa Martinez  
Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia  
Email: carlos2201948@correo.uis.edu.co

Dana Cotes Cala  
Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia  
Email: dana2212256@correo.uis.edu.co

**Abstract**—We implemented M-PSK and QPSK modulations in GNU Radio to generate the complex envelope and visualize constellations. We characterized their spectrum and bandwidth, validated VCO versus truth-table implementations, and analyzed noise robustness. These results establish a foundation for future SDR hardware integration.

**Index Terms**—M-PSK; QPSK; GNU Radio; radio definida por software (SDR); envolvente compleja; diagrama de constelación; densidad espectral de potencia (PSD); ancho de banda; tasa de símbolos; VCO; tabla de verdad; Vector Source.

**Repositorio:** [https://github.com/DamaGit/com2\\_A1\\_G-9/tree/38442743c9b6d8c15981e8d294c1fe8738c6c48d/Pr%C3%A1ctica\\_5](https://github.com/DamaGit/com2_A1_G-9/tree/38442743c9b6d8c15981e8d294c1fe8738c6c48d/Pr%C3%A1ctica_5)

## I. INTRODUCCIÓN

El presente laboratorio tuvo como objetivo implementar y analizar la modulación M-QAM utilizando GNU Radio, con el fin de comprender parámetros clave como el ancho de banda, la eficiencia espectral y la relación entre la tasa de bits y de símbolos. Además, se analizó el diagrama de constelación para observar el impacto del ruido y se implementó la envolvente compleja como base para futuros sistemas SDR.

## II. OBJETIVOS

- Analizar diagramas de constelación para diferentes valores de M.
- Comparar el desempeño de M-QAM con M-PSK en términos de robustez y eficiencia.

## III. MARCO TEÓRICO

### A. Fundamentos de Modulación M-QAM

La modulación M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) es una técnica que modula tanto la amplitud como la fase de la portadora, permitiendo una mayor eficiencia espectral. La señal M-QAM se puede expresar como:

$$s(t) = A_i \cos(2\pi f_c t) - B_i \sin(2\pi f_c t)$$

donde  $A_i$  y  $B_i$  son las amplitudes en fase y cuadratura correspondientes al símbolo  $i$ .

### B. Diagramas de Constelación

En M-QAM, los símbolos se distribuyen en una rejilla rectangular. La distancia mínima entre símbolos para una constelación rectangular es:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{6 \log_2(M)}{M-1}} \cdot A$$

### C. Análisis Espectral y Eficiencia

La eficiencia espectral para M-QAM es:

$$\eta = \log_2(M) \quad [\text{bits/s/Hz}]$$

## IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se implementó en GNU Radio un esquema M-QAM utilizando bloques como:

- Random Source para generar bits aleatorios.
- Chunks to Symbols para mapear bits a símbolos complejos.
- Constellation Modulator para modular la señal.
- QT GUI Constellation Sink para visualizar la constelación.
- QT GUI Frequency Sink para visualizar el espectro.

Se realizaron pruebas para  $M = 16$  y se compararon con modulaciones M-PSK.

## V. METODOLOGÍA

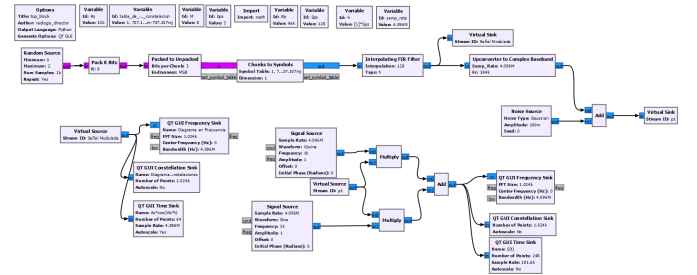
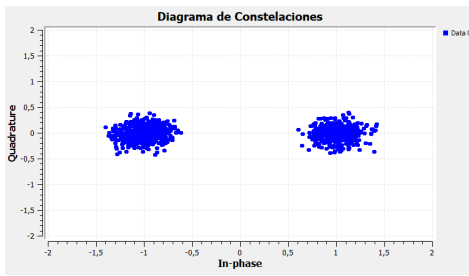


Fig. 1: Flujograma GNU Radio utilizado

Se utilizaron los flujogramas base y programaron bloques python block para generar la señal pasabandas.

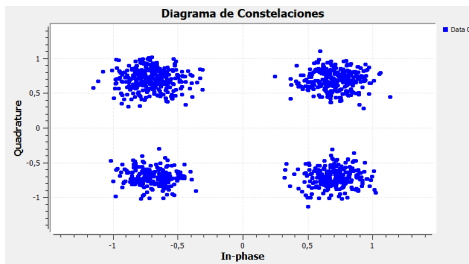
### A. Diagramas de Constelación

Se observaron las constelaciones para el valor de M, notando la distribución rectangular de los símbolos en 16-QAM frente a la circular en M, junto con las variaciones de un sistema M-PSK.



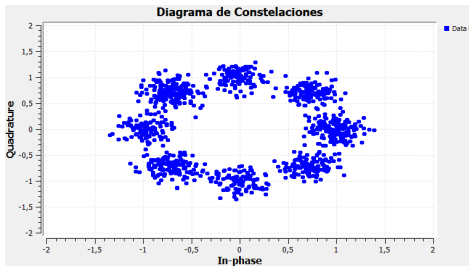
**Fig. 2:** Constelación BPSK

La modulación **BPSK (Binary Phase Shift Keying)** utiliza dos fases separadas por  $180^\circ$ , representando los bits 0 y 1. En el diagrama de constelación se observan dos puntos ubicados en extremos opuestos del eje real. Esta modulación es la más robusta frente al ruido, ya que los símbolos están ampliamente separados, pero su eficiencia espectral es baja (1 bit por símbolo).



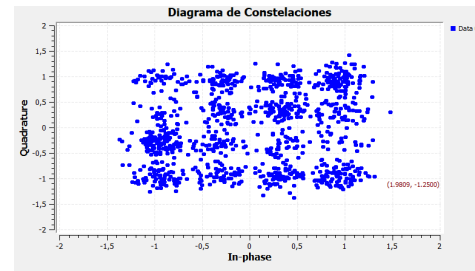
**Fig. 3:** Constelación QPSK

La modulación **QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)** utiliza cuatro fases separadas por  $90^\circ$ , representando 2 bits por símbolo. En el diagrama de constelación se observan cuatro puntos equidistantes en un círculo. Esta modulación ofrece el doble de eficiencia espectral que BPSK (2 bits por símbolo) manteniendo buena robustez al ruido.



**Fig. 4:** Constelación 8-PSK

La modulación **8-PSK** utiliza ocho fases separadas por  $45^\circ$ , representando 3 bits por símbolo. En el diagrama de constelación se observan ocho puntos equidistantes en un círculo. Esta modulación incrementa la eficiencia espectral a 3 bits por símbolo, pero reduce la robustez al ruido debido a la menor separación angular entre símbolos.

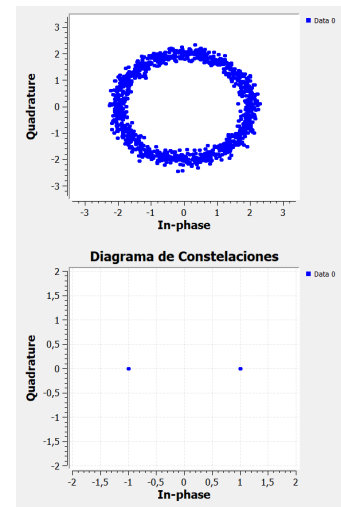


**Fig. 5:** Constelación 16-QAM

La modulación **16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** combina modulación en amplitud y fase, representando 4 bits por símbolo. En el diagrama de constelación se observa una rejilla  $4 \times 4$  de puntos. Esta modulación ofrece alta eficiencia espectral (4 bits por símbolo) pero es más sensible al ruido y requiere una relación señal-ruido más elevada para mantener la misma tasa de error.

### B. Diagramas de Constelación

Se observaron las constelaciones para el valor de  $M$ , notando la distribución rectangular de los símbolos en 16-QAM frente a la circular en  $M$ , junto con las variaciones de un sistema  $M$ -PSK.



**Fig. 6:** Constelación en BP

La Figura 6 muestra la señal **BPSK en pasabanda**, generada al modular una portadora sinusoidal con la secuencia de bits en fase y contrafase. Mientras que en la versión en banda base la señal alterna entre valores discretos  $-1$  y  $+1$ , en la pasabanda esta información se traduce en **variaciones de fase de la portadora**. La envolvente compleja correspondiente a esta señal describe un círculo unitario con dos puntos opuestos en la constelación, lo que refleja la simplicidad y robustez de la modulación BPSK frente al ruido.

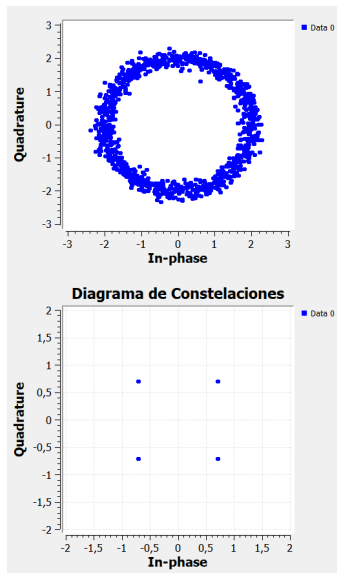


Fig. 7: Constelación QPSK en BP

La Figura 7 presenta la modulación **QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)** en su versión pasabanda. En esta modulación, cada símbolo representa dos bits, codificados en cuatro posibles fases de la portadora:  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  y  $315^\circ$ . Esto permite duplicar la tasa de transmisión de información respecto a BPSK, manteniendo un ancho de banda similar.

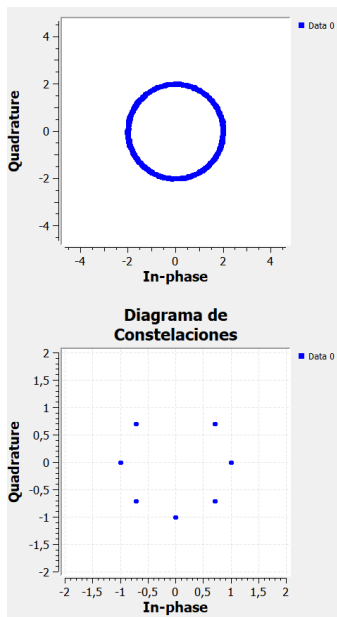


Fig. 8: Constelación 8-PSK

La Figura 8 ilustra la modulación **8-PSK (8 Phase Shift Keying)**, donde cada símbolo representa tres bits y se asigna a una de ocho fases igualmente espaciadas en  $45^\circ$ . Esto incrementa la eficiencia espectral, ya que transmite más información por símbolo.

En el tiempo, la señal presenta transiciones de fase más pequeñas y frecuentes, lo que la hace visualmente más continua

que BPSK o QPSK. Sin embargo, al haber más niveles de fase, la distancia entre símbolos en la constelación se reduce, lo que vuelve al sistema más sensible al ruido y a errores de sincronización.

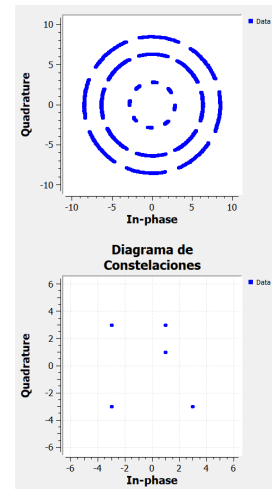


Fig. 9: Constelación 16-QAM

La Figura 9 muestra la modulación **16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** en pasabanda. A diferencia de PSK, QAM combina variaciones tanto en fase como en amplitud para codificar la información, lo que permite representar 16 símbolos distintos (4 bits por símbolo).

En el dominio temporal, la señal presenta cambios simultáneos en la envolvente (amplitud) y en la fase de la portadora. Esto genera una forma de onda más compleja, con variaciones continuas en la amplitud de los pulsos.

En el dominio de frecuencia, el espectro se expande ligeramente debido a la mayor cantidad de transiciones posibles. La constelación correspondiente forma una cuadrícula de 16 puntos, cada uno representando una combinación única de amplitud y fase.

La modulación 16-QAM logra un equilibrio entre eficiencia espectral y velocidad de transmisión, aunque a costa de una mayor sensibilidad al ruido, lo que requiere un canal con buena relación señal-ruido (SNR).

### C. Espectro de Potencia

Se analizó la densidad espectral de potencia (PSD) de las señales M-QAM, comparando el ancho de banda ocupado con el de M-PSK.

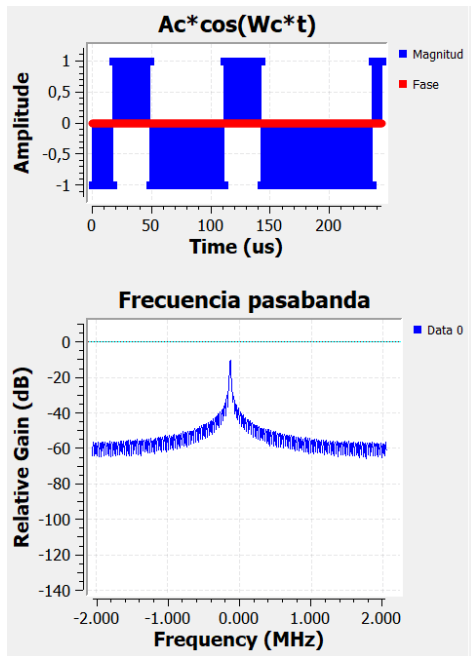


Fig. 10: B-PSK BP

En la figura 10 se observa el espectro de la señal BPSK en pasabanda. La energía se concentra en torno a la frecuencia portadora, con simetría respecto a su eje central. Dado que sólo existen dos estados de fase, el contenido espectral es compacto, y el ancho de banda ocupado resulta reducido. Esto confirma que BPSK es altamente eficiente en términos de robustez frente al ruido.

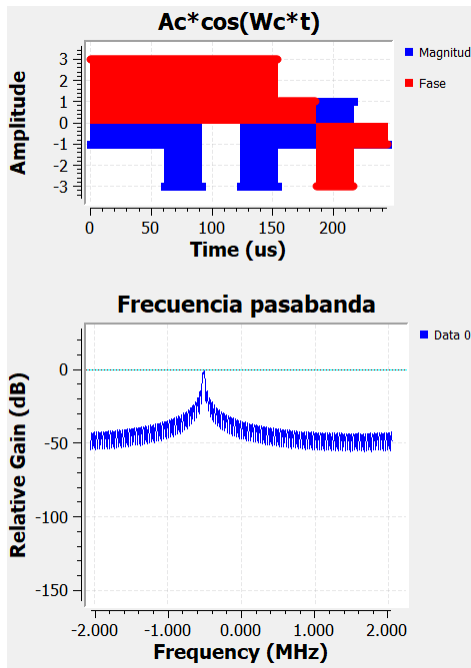


Fig. 11: 16-QAM BP

La figura 11 presenta el espectro de la señal 16-QAM, que combina variaciones tanto en amplitud como en fase. A

diferencia de las modulaciones PSK, el espectro de QAM es más ancho, reflejando la complejidad de la señal y la presencia de múltiples componentes en frecuencia. Esta modulación logra una alta eficiencia espectral (4 bits por símbolo), aunque requiere una relación señal-ruido (SNR) superior para mantener la integridad de la información transmitida.

#### D. Robustez al Ruido

Se introdujo ruido AWGN para evaluar la tolerancia a errores de cada esquema, observándose que M-QAM es más sensible al ruido que M-PSK para un mismo valor de M, por lo cual al momento de transmitir esto puede corregirse al aumentar la distancia entre los datos transmitidos o lo equivalente a aumentar la potencia del sistema. Requiriendo mayor potencia en la transmisión

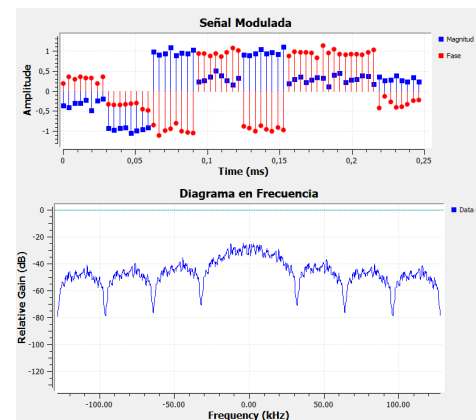


Fig. 12: Análisis en frecuencia 16-QAM con corrección en amplitud

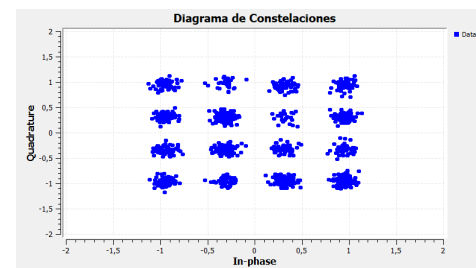


Fig. 13: Costelacion 16-QAM con corrección en amplitud

## VI. CONCLUSIONES

- 1) En el análisis comparativo se evidenció que la modulación BPSK presenta mayor robustez frente al ruido gracias a su mayor separación entre símbolos, mientras que la modulación 16-QAM ofrece una mayor eficiencia espectral al transmitir más bits por símbolo, aunque con una mayor susceptibilidad al ruido. Este equilibrio entre eficiencia y robustez es un aspecto clave en el diseño de sistemas de comunicación.
- 2) El análisis espectral demostró que, a medida que aumenta el número de símbolos  $M$ , el ancho de banda ocupado crece y la distancia entre símbolos disminuye. Esto confirma la relación teórica entre la complejidad

de la constelación y la sensibilidad al ruido, validando las observaciones obtenidas experimentalmente en GNU Radio.

- 3) La Figura 10, correspondiente al espectro de la señal BPSK, permitió evidenciar la concentración de energía en torno a la portadora, confirmando su eficiencia en el uso del ancho de banda. En contraste, la Figura 11 mostró cómo la modulación 16-QAM amplía su espectro por la combinación de variaciones en fase y amplitud, siendo más eficiente en transmisión pero más demandante en SNR.
- 4) En general, la práctica permitió comprender los fundamentos y aplicaciones de las modulaciones digitales M-PSK y M-QAM, destacando la importancia del compromiso entre robustez y eficiencia espectral en el diseño de enlaces de comunicación modernos. Además, se fortalecieron las habilidades en el uso de herramientas de radio definida por software (SDR) para análisis de señales reales.

## VII. ANEXOS

**Listing 1:** Bloque up-converter

```

1 import numpy as np
2 from gnuradio import gr
3
4 class blk(gr.sync_block):
5     """
6     Bloque embebido para convertir una
7     se al modulada en coseno
8     a una se al en base banda compleja.
9     """
10    def __init__(self, Samp_Rate=32000, Fc
11    =5000):
12        # Llamada al constructor de la
13        # clase base 'sync_block' de GNU
14        # Radio.
15        # Este tipo de bloque produce una
16        # muestra de salida por cada
17        # muestra de entrada.
18        gr.sync_block.__init__(
19            self,
20            name='Upconverter to Complex
21            Baseband', # Nombre del
22            # bloque que aparece en GNU
23            # Radio Companion
24            in_sig=[np.complex64], # Tipo
25            # de se al de entrada (
26            # aqu est definido como
27            # compleja)
28            out_sig=[np.complex64] # Tipo
29            # de se al de salida (
30            # compleja)
31        )
32
33    # Almacena los par metros de
34    # configuraci n del bloque
35    self.samp_rate = float(Samp_Rate)
36    # Frecuencia de muestreo
37    self.fc = float(Fc)
38    # Frecuencia portadora

```

```

23    self.phase = 0.0
24        # Fase inicial del oscilador
25        local
26    # Incremento de fase por muestra (
27    en radianes)
28    self.phase_inc = 2 * np.pi * self.
29    fc / self.samp_rate
30
31    def work(self, input_items,
32    output_items):
33        """
34        Funci n principal del bloque.
35        Recibe un vector de muestras de
36        entrada y produce el vector de
37        salida.
38        """
39        in0 = input_items[0] # Se al de
40        entrada (vector numpy)
41        out = output_items[0] # Vector
42        donde se almacenar la salida
43
44        n = len(in0) # N mero
45        de muestras del bloque de
46        trabajo actual
47        t = np.arange(n) # Vector de
48        ndices de muestra
49
50        # Calcula la fase acumulada del
51        # oscilador local para cada
52        # muestra
53        phases = self.phase + t * self.
54        phase_inc
55
56        # Genera una se al compleja de
57        # referencia e^{-j2 Fc t}
58        # (mezclador complejo para
59        # trasladar la se al a base
60        # banda)
61        mixer = np.exp(-1j * phases).astype
62        (np.complex64)
63
64        # Multiplica la se al de entrada
65        # por el mezclador
66        # Esto efect a una conversi n de
67        # frecuencia (demodulaci n)
68        out[:] = in0 * mixer
69
70        # Actualiza la fase del oscilador
71        # para mantener continuidad entre
72        # llamadas a 'work'
73        self.phase = (self.phase + n * self
74        .phase_inc) % (2 * np.pi)
75
76        # Devuelve el n mero de muestras
77        # procesadas
78        return len(out)

```

## REFERENCES

- [1] H. Ortega, B. Bodá, O. Mauricio, and R. Torres, "Comunicaciones digitales basadas en radio definida por software," [Online]. Available: <https://sites.google.com/saber.uis.edu.co/comdig>.