

PRÁCTICA 5: Modulación M-QAM

Michel Dayanna Salazar Gómez*, Juan Sebastian Rojas Ariza†

michel2214194@correo.uis.edu.co, juan2164699@correo.uis.edu.co

Bucaramanga, Santander, Colombia

https://github.com/MichelSalazarG/CommII_LabB1_G7_MichelS_JuanR.git

07 de Noviembre de 2025

Abstract In this laboratory practice, a comparative analysis of different digital modulation techniques, including BPSK, QPSK, 8-PSK, and 16-QAM, was carried out under the influence of additive Gaussian noise. The main objective was to observe the behavior of each modulation through constellation diagrams and power spectral density, in order to evaluate their robustness against noise and their spectral efficiency. Additionally, passband signals were analyzed to gain a deeper understanding of symbol variations according to Gray mapping and their relationship with digital data transmission.

Keywords: M-QAM, M-PSK, PSD, constellation diagram, digital modulation.

1. Introducción

La modulación digital es un elemento clave en los sistemas modernos de comunicación, ya que permite transmitir información de forma eficiente a través de canales limitados y afectados por ruido. Entre las técnicas más empleadas se encuentra la modulación por amplitud en cuadratura (M-QAM), que combina variaciones de amplitud y fase para representar varios bits por símbolo, optimizando así la capacidad sin aumentar significativamente el ancho de banda.

Este laboratorio tiene como objetivo implementar y analizar diferentes esquemas de modulación digital, como BPSK, QPSK, 8-PSK y 16-QAM, utilizando la plataforma GNU Radio. Se evalúan las constelaciones, espectros de frecuencia y tasas de bits en condiciones ideales y con ruido, para comprender su comportamiento y eficiencia.

A través de este proceso experimental, se busca consolidar la comprensión de los principios que rigen la modulación digital y su desempeño en entornos reales, estableciendo comparaciones entre diferentes técnicas y evaluando su eficiencia, robustez y aplicabilidad en diversos escenarios de comunicación.

2. Metodología

El desarrollo del laboratorio se basa en una metodología experimental que permite implementar,

analizar y comparar diferentes esquemas de modulación digital mediante el uso del software GNU Radio. El proceso se estructura en etapas que facilitan la construcción del modelo de simulación, la ejecución de los experimentos y el análisis de los resultados obtenidos.

En primera instancia, se crea un nuevo directorio para la práctica y se organiza el proyecto en un repositorio, con el fin de mantener la trazabilidad de los archivos y avances. Posteriormente, se diseña en GNU Radio el flujograma que representa el sistema de modulación digital, incorporando los bloques necesarios para la generación, modulación y observación de las señales.

Durante la práctica se implementan los esquemas de modulación BPSK, QPSK, 8PSK y 16-QAM, configurando los parámetros de cada uno para su análisis comparativo. Para cada técnica se obtienen las constelaciones, los espectros de frecuencia y la tasa de bits, tanto en condiciones ideales como en presencia de ruido aditivo gaussiano blanco (AWGN), con el propósito de evaluar su comportamiento y desempeño frente a la interferencia.

Posteriormente, se realiza la simulación de las señales en su versión pasa-banda, incorporando un conversor ascendente (Up-Converter) al final del flujograma. Esta etapa permite analizar cómo las señales moduladas se desplazan en frecuencia, emulando el proceso de transmisión real en sistemas de comunicación inalámbrica. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de cada esquema de modulación para identificar diferencias en términos de eficiencia espectral, robustez y calidad de la señal.

3. Resultados y Análisis de Resultados

3-A. Análisis de diferentes tipos de modulaciones con ruido

Para la realización del punto se hizo el siguiente esquemático 6 donde se muestra como seria el bloque para las diferentes modulaciones tomado de [1] en el cual se hicieron las modificaciones que se encuentran en el repositorio y la adición de ruido para las comparativas.

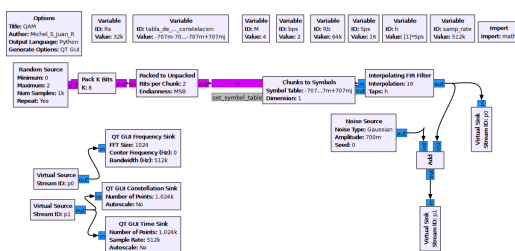


Figure 1: Esquemático para la constelación y parámetros importantes de las modulaciones.

En la siguiente tabla I se puede observar los diferentes valores tenidos en cuenta para las diferentes modulaciones.

Table I: Coordenadas (Real, Imaginario) de los símbolos para diferentes modulaciones.

Modulación	Pares (Real, Imaginario)
16-QAM	(-3, -3), (-1, -3), (1, -3), (3, -3), (3, -1), (1, -1), (-1, -1), (-3, -1), (-3, 1), (-1, 1), (1, 1), (3, 1), (3, 3), (1, 3), (-1, 3), (-3, 3)
8PSK	(1, 0), (0.77, 0.77), (0, 1), (-0.77, 0.77), (-1, 0), (-0.77, -0.77), (0, -1), (0.77, -0.77)
BPSK	(1, 0), (-1, 0)
QPSK	(-0.707, -0.707), (0.707, -0.707), (-0.707, 0.707), (0.707, 0.707)

3-B. Análisis de las modulaciones BPSK y QPSK

En la figura 2 y la figura 3 se muestran las gráficas de constelación y densidad espectral de potencia correspondientes a las modulaciones BPSK y QPSK, bajo tres niveles de ruido: 0.02, 0.2 y 0.7.

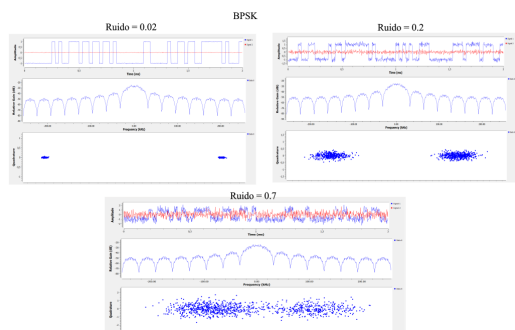


Figure 2: Constelaciones y espectros de BPSK para distintos niveles de ruido.

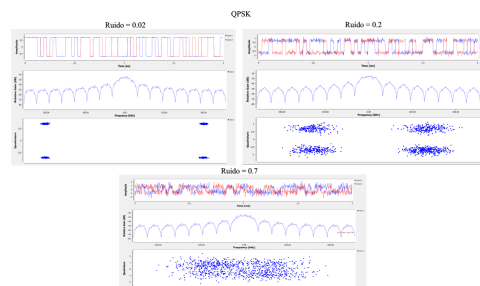


Figure 3: Constelaciones y espectros de QPSK para distintos niveles de ruido.

- **Constelaciones:** En ambos casos, se observa que a medida que el nivel de ruido aumenta, los puntos de la constelación se dispersan con mayor intensidad. - Con *ruido bajo* (0.02), los símbolos se agrupan correctamente en sus posiciones ideales, con mínima distorsión. - Con *ruido medio* (0.2), aparece una ligera dispersión, aunque la detección sigue siendo confiable. - Con *ruido alto* (0.7), los puntos se solapan, reduciendo la exactitud en la demodulación. BPSK presenta mayor robustez frente al ruido al tener solo dos fases posibles, mientras que QPSK, con cuatro fases, logra mayor eficiencia espectral sacrificando algo de tolerancia al ruido.
- **Espectro:** Ambas modulaciones presentan una forma de espectro sinc², concentrada en torno a la frecuencia portadora. El aumento del ruido eleva el piso espectral y amplía el ancho de banda efectivo. El comportamiento del espectro en QPSK es similar al de BPSK, aunque ligeramente más ancho debido a su mayor tasa de símbolos complejos.
- **Tasa de bits:** La tasa de bits se define como:

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M) \quad (1)$$

Para BPSK ($M = 2$), $R_b = R_s$, mientras que para QPSK ($M = 4$), $R_b = 2R_s$. De esta forma, QPSK duplica la tasa de transmisión respecto a BPSK, ofreciendo un equilibrio entre eficiencia espectral y robustez ante el ruido.

3-C. Análisis de la modulación 8PSK

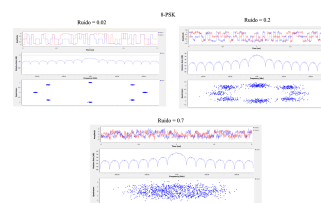


Figure 4: Gráficas de constelación y PSD para los diferentes análisis de la 8PSK.

- **Constelaciones** En la modulación 8PSK, con un ruido de 0.02 los ocho puntos de la constelación se distinguen con claridad y buena separación. Con un nivel de 0.7, la constelación pierde su forma circular y los símbolos se superponen, elevando considerablemente la tasa de error como se aprecia en la figura 4.
- **Espectro** El piso de ruido se eleva y el espectro se ensancha ligeramente debido a las componentes aleatorias introducidas por el ruido.
- **Tasa de bits** La modulación 8PSK transmite 3 bits por símbolo, por lo que su eficiencia espectral como se muestra en la ecuación 1. Donde $M = 8$. Por tanto la $R_b = R_s \cdot 3 = 3R_s$. La modulación 8PSK presenta una eficiencia espectral alta, pero una robustez al ruido media-baja debido a la menor separación angular entre los símbolos en la constelación.

3-D. Análisis de la modulación 16-QAM

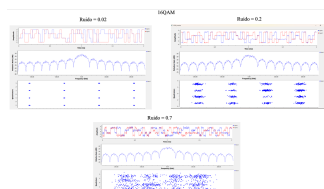


Figure 5: Gráficas de constelación y PSD para los diferentes análisis de la 16-QAM.

- **Constelaciones** En la modulación 16-QAM, con un ruido de 0.02 los 16 puntos se distribuyen de forma precisa en una cuadrícula bien definida. A medida que el ruido aumenta a 0.2, los puntos comienzan a dispersarse moderadamente y algunos se aproximan a los límites de decisión. Con un nivel de 0.7, la constelación se distorsiona notablemente elevando de manera considerable la tasa de error como se aprecia en la figura 5.
- **Espectro** El espectro de la modulación 16-QAM presenta una distribución más ancha en frecuencia, producto de la mayor complejidad de la señal. Con bajo nivel de ruido, la energía se concentra principalmente en torno a la portadora. A medida que aumenta el ruido, el piso espectral se eleva y el ancho de banda efectivo se amplía debido a las componentes aleatorias introducidas.
- **Tasa de bits** La modulación 16-QAM transmite 4 bits por símbolo, por lo que su eficiencia espectral como se muestra en la ecuación 1. Donde $M = 16$. Por tanto: $R_b = R_s \cdot 4 = 4R_s$. La modulación 16-QAM presenta una eficiencia espectral alta, pero

una robustez al ruido baja debido a la menor separación entre símbolos y a la sensibilidad a las variaciones de amplitud y fase.

3-E. Versión pasa-bandas simulada

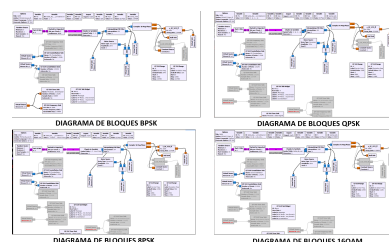


Figure 6: Diagrama de bloque para BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM

Se utilizaron señales moduladas en banda base ((BPSK, QPSK, 8PSK y 16-QAM)) como entrada. A cada una se le aplicó un Up-Converter para obtener su versión pasa-banda, desplazándolas a una frecuencia portadora. En la Figura 6 se observan los diferentes diagramas de bloques utilizados para cada esquema de modulación. Posteriormente, se analizaron tres aspectos clave:

- **La constelación:** para evaluar la distribución de símbolos.
- **El espectro de frecuencia:** para observar la ocupación espectral.
- **La tasa de bits:** para comparar la eficiencia en la transmisión de datos.

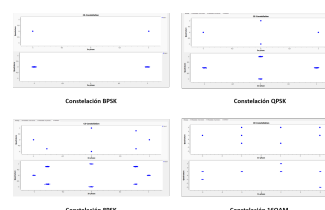


Figure 7: Constelaciones de las modulaciones analizadas.

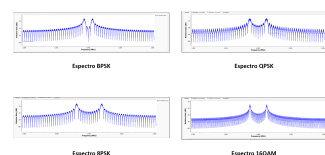


Figure 8: Espectro de las modulaciones.

- **Constelación:** En la figura 7 se muestran las **constelaciones** ideales y con ruido de las modulaciones



BPSK , QPSK , 8PSK y 16-QAM . En la parte superior de cada caso se observan las constelaciones ideales: dos puntos para BPSK que representan los bits 0 y 1 con fases de 0° y 180° ; cuatro puntos equidistantes en el plano I-Q para QPSK, correspondientes a combinaciones de dos bits; ocho puntos sobre un círculo para 8PSK, cada uno codificando 3 bits; y una cuadrícula de 16 puntos para 16-QAM, donde cada símbolo de 4 bits combina amplitud y fase. En las representaciones inferiores, con ruido en pasa-banda, los puntos ideales se transforman en “nubes” dispersas alrededor de sus posiciones. Aunque en BPSK y QPSK los grupos permanecen claramente distinguibles, en 8PSK la dispersión es mayor, y en 16-QAM la cercanía entre símbolos incrementa la sensibilidad al ruido y la probabilidad de error.

- **Espectro:** En la figura 8 se muestra el **espectro** de potencia de las modulaciones **BPSK, QPSK, 8PSK y 16-QAM** después de la modulación y conversión ascendente a pasa-banda. En todas las modulaciones se observa una banda de frecuencia central donde se concentra la mayor parte de la energía, acompañada de lóbulos laterales decrecientes a ambos lados, característica de una señal modulada en portadora. El *Up-Converter* desplaza la señal de banda base hacia la frecuencia portadora, evidenciando el centrado del espectro. Las formas espectrales de BPSK, QPSK y 8PSK son muy similares, ya que comparten modulación de fase y el mismo filtro de conformación de pulso. En cambio, la 16-QAM mantiene una estructura parecida, pero su ventaja radica en una mayor eficiencia espectral, al transmitir más bits por símbolo sin incrementar significativamente el ancho de banda ocupado.
- **Tasa de bits (R_b y BER):** En la implementación de la modulación M-QAM en pasa-banda simulada, se consideraron dos aspectos fundamentales relacionados con la "rata de bits": la tasa de bits de transmisión (R_b) y la tasa de error de bits (BER). **Tasa de Bits de Transmisión (R_b):** La variable R_b indica la velocidad a la que los bits de información se transmiten en el sistema. Para mantener un ancho de banda comparable y analizar la eficiencia espectral, la **Tasa de Símbolos (R_s)** se fijó en 32[kbps] para todas las modulaciones. Así, R_b depende directamente del número de bits por símbolo ($k = \log_2 M$): BPSK= 32[kbps], QPSK= 64[kbps], 8PSK= 96[kbps] y 16-QAM= 128[kbps]. **Constelaciones con ruido:** En las gráficas de constelación se observa que la adición de un ruido gaussiano de 20[m] de amplitud genera una dispersión de

los puntos ideales, reflejando visualmente la probabilidad de error. La separación entre los grupos disminuye conforme aumenta el orden de modulación: BPSK presenta dos grupos bien definidos (BER baja), QPSK muestra cuatro más cercanos (BER ligeramente mayor), 8PSK evidencia mayor superposición (BER más alta) y 16-QAM exhibe la mayor densidad y dispersión, resultando en la BER más elevada para el mismo nivel de ruido.

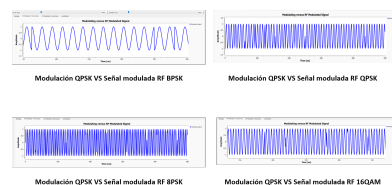


Figure 9: Modulación VS Señal modulada RF.

En la figura 9 se observa que las señales (BPSK, QPSK, 8PSK y 16QAM) se encuentran correctamente moduladas y convertidas a pasa-banda en el dominio del tiempo.

4. Conclusiones

- A medida que aumenta el número de bits por símbolo (orden de modulación), las modulaciones logran una mayor eficiencia espectral, aunque se vuelven más susceptibles al ruido. En la implementación en pasa-banda, se comprobó que esta eficiencia (R_b) crece con el orden de la modulación manteniendo constante la tasa de símbolos. La modulación QPSK representa un equilibrio adecuado entre eficiencia y robustez, ofreciendo buen desempeño tanto en entornos ruidosos como en condiciones de transmisión moderadas.
- La modulación 16-QAM presenta la mayor eficiencia espectral entre las analizadas, gracias a su capacidad para transmitir más bits por símbolo. Es ideal para aplicaciones que requieren altas tasas de transmisión y gran resolución, siempre que el canal presente bajo nivel de ruido.
- Se observó que las modulaciones son sensibles al ruido, y que el espectro de densidad de potencia se ve afectado por el mismo. El ancho de banda efectivo tiende a variar según el nivel de ruido y el tipo de modulación, incrementándose cuando la señal se degrada o el canal se vuelve más ruidoso.

Referencias

- [1] hortegab, “Comdigpractices2021sii: Fase ii/pract2,” <https://github.com/hortegab/ComdigPractices2021sii/tree/main/Fase%20II/pract2>, 2021, gitHub repository.