

Práctica 5: Modulación M-QAM

Anderson David Hernandez Rodriguez - 2202930

Karen Daniela Rangel Uribe - 2191709

Sharon Catalina Vargas Cortes - 2211259

[https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2_{B1G2}](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 report presents the design and simulation of various digital modulation schemes using GNU Radio, emphasizing the practical evaluation of M-QAM and other constellation-based techniques. The study involves implementing BPSK, QPSK, 8PSK, and 16-QAM under baseband and passband conditions, including noise scenarios. Key metrics such as constellation clarity, spectral behavior, and bit rate efficiency were analyzed. The outcomes demonstrate the effectiveness of GNU Radio for prototyping digital communications and provide a comparative view of modulation strategies for bandwidth-limited systems.

1. Introducción

La modulación M-QAM es una técnica fundamental en los sistemas modernos de comunicación digital por su eficiencia en el uso del espectro. Este laboratorio tiene como propósito implementar y comparar distintos esquemas de modulación digital (BPSK, QPSK, 8PSK y 16-QAM) usando GNU Radio. Se analizan sus constelaciones, espectros y tasas de bits, tanto en banda base como en pasabanda, considerando además el efecto del ruido en cada caso.

2. Metodología

La práctica se desarrolló en un entorno de simulación donde se construyeron y analizaron diferentes esquemas de modulación digital. Para organizar el trabajo y asegurar un registro adecuado del avance, se creó una carpeta de trabajo vinculada a un repositorio en línea que permitió el control de versiones.

En primera instancia, se implementaron los esquemas de modulación BPSK, QPSK, 8PSK y 16-QAM en banda base. Para cada uno de ellos se generaron diagramas de constelación, se visualizó el espectro de la señal y se evaluó la tasa de bits transmitida. Además, se introdujo ruido en las señales para estudiar el efecto de este sobre el desempeño de cada técnica.

Posteriormente, se construyeron las versiones pasabanda de los mismos esquemas. Para ello, se incorporó un conversor ascendente al final de la cadena de bloques, permitiendo simular el desplazamiento de frecuencia típico en sistemas de transmisión reales.

Finalmente, se realizó una comparación entre las distintas modulaciones en sus versiones banda base y pasabanda, tanto en condiciones ideales como ruidosas, con el fin de evaluar su eficiencia espectral, su robustez frente al ruido y la claridad de sus constelaciones.

i

2.1. Modulación OOK: RF vs EC

Después de comprobar el funcionamiento del flujo-grama analizando una señal OOK (On-Off Keying) en versiones RF y EC comparando ambas señales en el dominio del tiempo mediante la pestaña RF Modulated. Time Domain observando la señal modulada en RF junto con las componentes I y Q de la versión EC y en la pestaña RF Modulated. Freq Domain", comparando sus espectros en el dominio de la frecuencia y variando la frecuencia de la portadora (Carrier Freq) en dos ocasiones para evaluar su impacto en la modulación se obtuvieron los siguientes resultados.

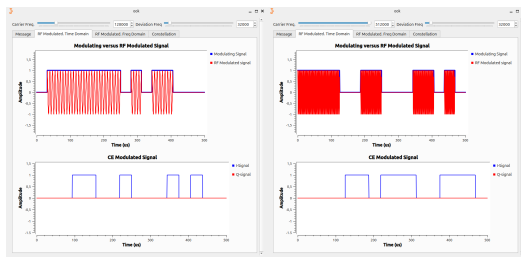


Figura 5. Señal OOK (RF - EC)

En la Fig. 5 se comparan señales con frecuencias portadoras de 128 kHz y 512 kHz. La señal en envolvente compleja (EC) se mantiene sin cambios al variar la frecuencia portadora, ya que está en banda base. En cambio, la señal en RF sí refleja los cambios en frecuencia, evidenciando la influencia directa de la portadora.

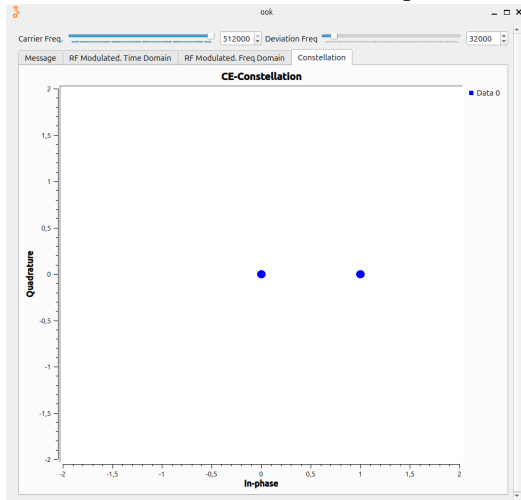


Figura 6. Diagrama de constelación de la señal con una frecuencia portadora de 512KHz)

En la Fig. 6 se presenta la constelación de una señal OOK modulada a 512 kHz. Los puntos se ubican solo sobre el eje in-phase, sin componente imaginaria, debido a un ajuste en el bloque e-CE-VCO-fc que evita la introducción de componente cuadratura. Esto da como resultado una señal real con dos niveles de amplitud, propios de la modulación OOK.

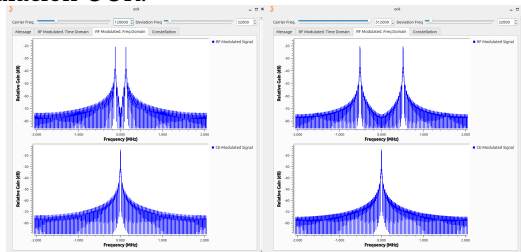


Figura 7. Diagrama de constelación de la señal con una frecuencia portadora de 512KHz)

La Fig 7, muestra cómo el aumento de la frecuencia portadora desplaza el espectro de la señal RF hacia frecuencias más altas, generando picos simétricos. En contraste, la envolvente compleja se mantiene centrada en cero, ya que es una señal en banda base. El contenido espectral no cambia, solo su ubicación en frecuencia.

2.2. e_RF_VCO_ff y el e_EC_VCO_fc

Posteriormente, se realizó un análisis detallado de los bloques e_RF_VCO_ff y e_EC_VCO_fc. A partir de este estudio, se elaboró un texto de ayuda pensado para orientar a cualquier usuario que tenga dudas sobre el funcionamiento de dichos bloques. El texto desarrollado para el bloque e_RF_VCO_ff es el siguiente:

This block is a RF VCO and works as following:
It takes two input signals:
- A: Amplitude signal (carrier amplitude)
- Q: Phase signal (instantaneous phase)

The block generates an output signal which is a cosine wave modulated in phase according to the input signals. The frequency of the generated wave is determined by the carrier frequency (fc) and the sampling rate (samp_rate).

The formula used for the output signal is:
 $y[n] = A[n] \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot n / \text{samp_rate} + Q[n])$

Where:
- n is the sample index,
- fc is the carrier frequency,
- samp_rate is the sampling rate,
- A[n] and Q[n] are the input signals.

This block acts as a Voltage-Controlled Oscillator (VCO) in RF applications, generating a frequency-modulated waveform based on the input parameters.

Usage recommendations:
- Ensure that the sampling rate (samp_rate) is at least twice the carrier frequency (fc) to avoid aliasing.
- Check the values of fc and samp_rate to ensure the generated signal falls within the expected bandwidth of the communication system.

Figura 8. Help Message for Block e_RF_VCO_ff

El texto creado para el bloque e_EC_VCO_fc se puede observar a continuación:

Help Message for Block e_CE_VCO_fc

This block is a CE VCO or baseband VCO and works as following:
It receives two input signals:
- A: Amplitude signal (modulation amplitude)
- Q: Phase signal (instantaneous phase)

The block generates an output signal that is a complex exponential wave, where the amplitude is determined by A and the phase by Q. This is commonly used in baseband processing, where signals are represented in the complex domain.

The formula used for the output signal is:
 $y[n] = A[n] \cdot \exp(1j \cdot Q[n])$

Where:
- n is the sample index,
- A[n] is the input amplitude signal,
- Q[n] is the phase input signal,
- 1j represents the imaginary unit.

This block acts as a baseband Voltage-Controlled Oscillator (VCO), generating a complex modulated waveform based on the input parameters.

Usage recommendations:
- Ensure the phase signal (Q) is continuous and smooth to avoid sudden phase jumps that could cause undesired spectral components.
- Use a proper sampling rate to avoid aliasing and maintain signal fidelity.

Figura 9. Help Message for Block e_CE_VCO_fc

2.3. Modulación BPSK: RF vs EC

Una vez adaptado el flujograma original para implementar un modulador BPSK en RF y EC, reutilizar los bloques desactivados realizando las interconexiones necesarias, ajustando la amplitud y la fase según el tipo de modulación se obtuvieron pruebas comparativas entre ambas versiones.

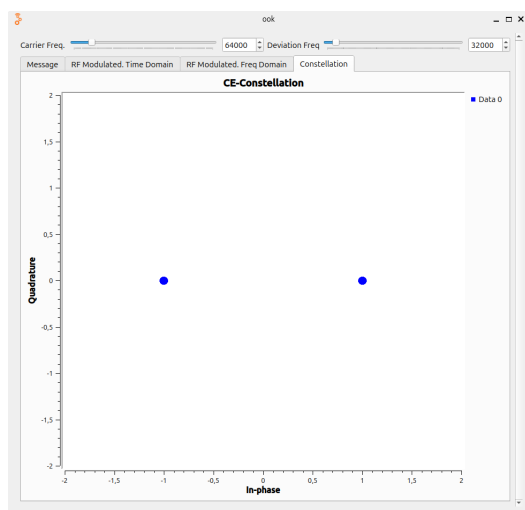


Figura 10. Diagrama de constelación señal BPSK (RF - EC)

En la Fig 10, se muestra un diagrama de constelación correspondiente a una modulación BPSK. La señal modulada tiene dos posibles fases (bits 0 y 1) y la ausencia de componentes en el eje de cuadratura. La separación entre los puntos muestran una transmisión limpia, sin presencia de ruido o interferencia significativa.

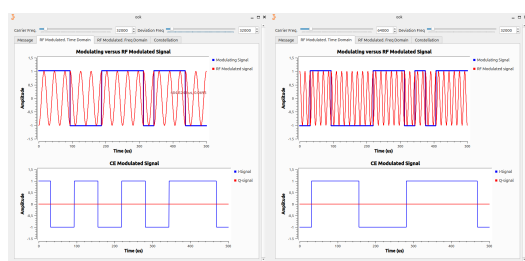


Figura 11. Señal modulada en RF - señal modulada CE

En la Fig 11, se observa que la señal modulada presenta únicamente variaciones en la componente en fase (I), mientras que la componente en cuadratura (Q) permanece constante en cero. En la gráfica superior la frecuencia de la señal RF modulada cambia según la información binaria de la señal moduladora, confirmando una modulación precisa y efectiva.

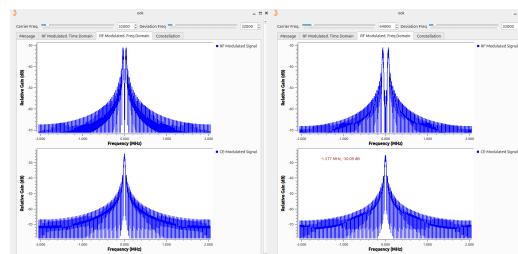


Figura 12. Señal modulada en RF - señal modulada CE en frecuencia

En la Fig 12, se presentan los espectros en frecuencia de la señal modulada en RF y su correspondiente señal CE. Al aumentar la frecuencia portadora de 32kHz (izquierda) a 64kHz (derecha), el espectro se desplaza hacia frecuencias más altas, manteniendo una distribución simétrica alrededor de la portadora. La forma del espectro muestra el ensanchamiento asociado a la modulación en frecuencia, donde el ancho de banda está relacionado con la frecuencia de desviación.

2.4. FSK tanto en versión RF como en versión EC

En el dominio del tiempo, al utilizar una desviación de frecuencia de 64kHz, se observa que la señal modulada en RF presenta una menor densidad de ciclos por cada bit, con transiciones más suaves entre los niveles. En la versión EC, las componentes I y Q mantienen una oscilación más regular y menos rápida, indicando una menor separación entre las frecuencias portadoras utilizadas para representar los bits '0' y '1'.

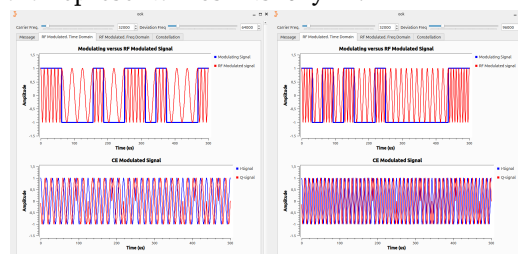


Figura 13. Señal FSK en dominio del tiempo con desviación de frecuencia de 64kHz (versión RF y EC)

En la Fig 14 se observa la señal FSK en el dominio del tiempo con una frecuencia portadora de 64kHz. Se aprecia cómo la señal modulada varía en función de la señal digital, manteniendo la misma amplitud pero cambiando la frecuencia de la portadora. A medida que aumenta la frecuencia portadora, se incrementa la densidad de ciclos por unidad de tiempo en la señal RF y también en la representación en cuadratura (I/Q).

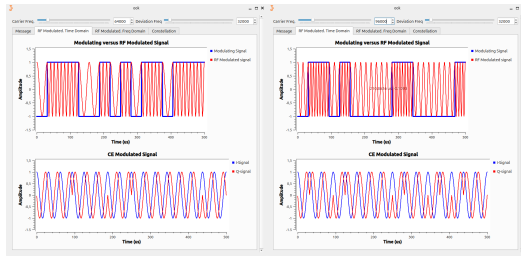


Figura 14. Variación de la frecuencia de desviación en modulación FSK (Dominio del tiempo)

2.5. FSK en la constelación

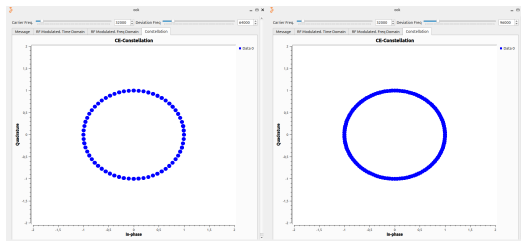


Figura 15. Diagrama de constelación señal FSK

En la Fig 15 se muestra la constelación de una señal modulada por FSK. A diferencia de modulaciones como BPSK o QPSK que presentan puntos discretos, en FSK la constelación forma un anillo continuo de puntos. Esto se debe a que la información se transmite mediante variaciones en la frecuencia y no en la fase o amplitud, lo que genera múltiples valores de fase momentánea durante la transmisión. En este caso, al aumentar la frecuencia de desviación (de 64kHz a 96kHz), se observa una mayor densidad de puntos sobre la circunferencia, lo cual indica una mayor separación entre las frecuencias usadas para representar los símbolos, y por tanto, una señal más robusta a interferencias, pero con mayor ancho de banda.

3. Conclusiones

- La modulación M-QAM es una técnica clave en los sistemas de comunicación digital, ya que permite transmitir múltiples bits por símbolo mediante la combinación de variaciones en fase y amplitud, lo que mejora significativamente la eficiencia espectral en comparación con modulaciones más simples como BPSK o QPSK.
- El análisis de las constelaciones y espectros asociados a diferentes modulaciones demuestra que, aunque M-QAM ofrece mayor capacidad de transmisión, también presenta mayor susceptibilidad al ruido, especialmente a medida que aumenta el número de niveles (M), lo que implica una compensación entre eficiencia y robustez.
- Comparar las señales en banda base y en pasabanda ayuda a entender cómo cambia la forma de la señal cuando se transmite, y por qué es importante elegir bien el tipo de modulación según el entorno de comunicación.

Referencias

- [1] ScienceDirect Topics. Quadrature Amplitude Modulation.
- [2] Mini-Circuits Blog. *A Primer on Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*. 2022.
- [3] Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. *Modulations Based on Constellations: BPSK, QPSK, M-PSK, M-QAM*. Presentación de clase. 2025. Archivo PDF.
- [4] Overleaf. *Espectro de Modulación QAM de M niveles*.