

4.1. Diagramas de Constelación

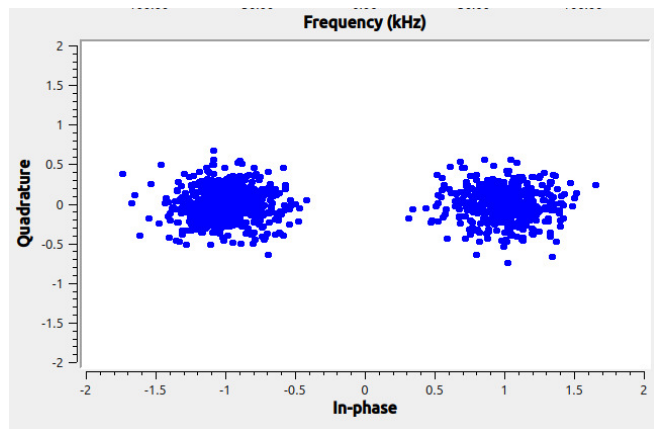


Fig. 3: Constelación BPSK

B-PSK emplea dos fases separadas por 180° , que corresponden a los bits 0 y 1. En el diagrama de constelación, se observan dos puntos situados en los extremos opuestos del eje real. Esta modulación es la más resistente al ruido, ya que los símbolos están bien distanciados entre sí, pero su eficiencia espectral es baja, transmitiendo solo 1 bit por símbolo.

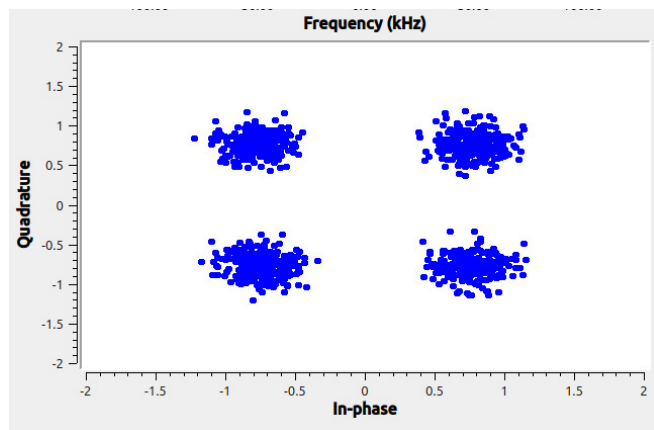


Fig. 4: Constelación QPSK

Esta modulación ofrece el doble de eficiencia espectral que BPSK (2 bits por símbolo) manteniendo buena robustez al ruido.

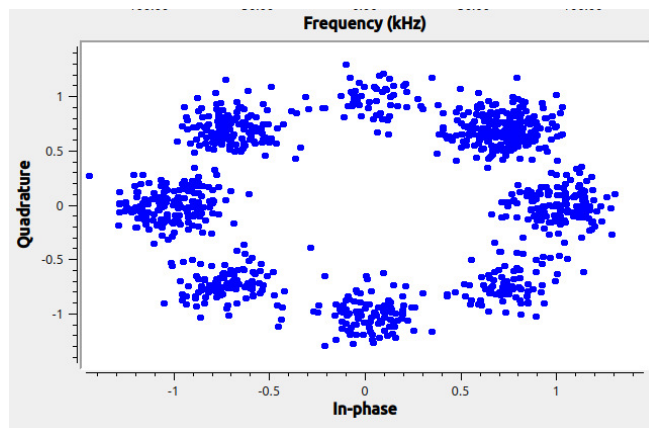


Fig. 5: Constelación 8-PSK

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.

La modulación 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) combina la modulación en amplitud y fase, permitiendo representar 4 bits por símbolo. En el diagrama de constelación, se puede ver una rejilla 4×4 de puntos. Esta modulación proporciona una alta eficiencia espectral (4 bits por símbolo), pero es más susceptible al ruido y requiere una mayor relación señal-ruido para funcionar adecuadamente.

4.2. Diagramas de Constelación

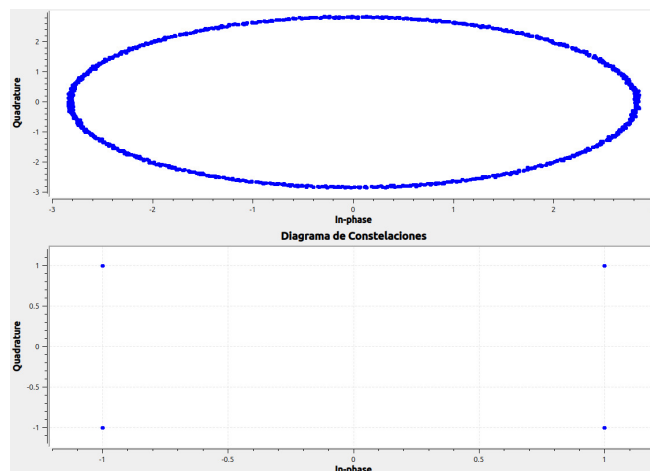


Fig. 8: Constelación QPSK en BP

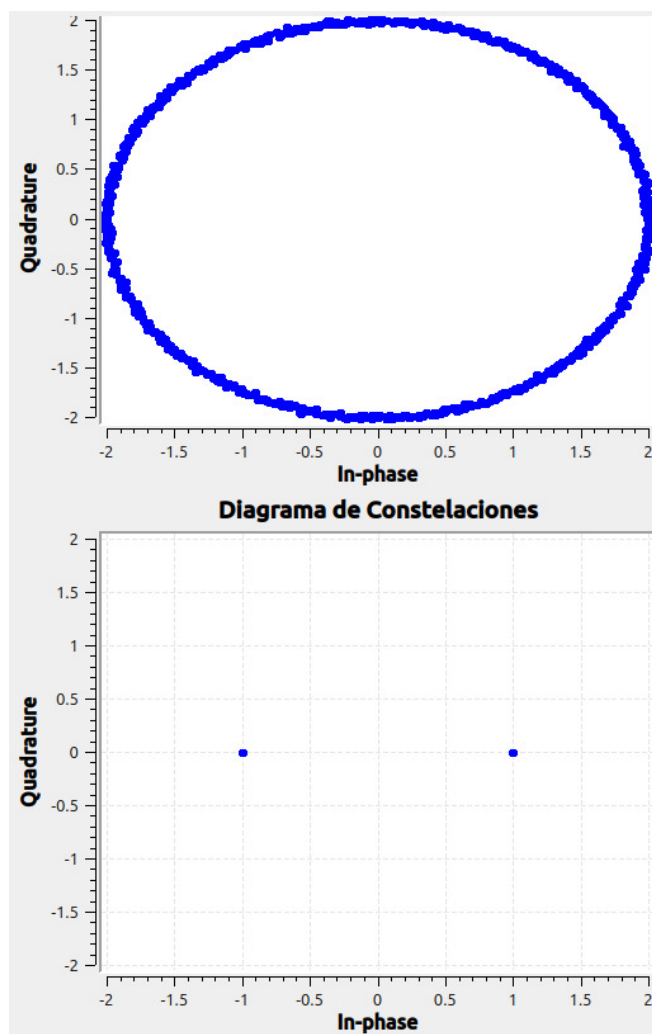


Fig. 7: Constelación en BP

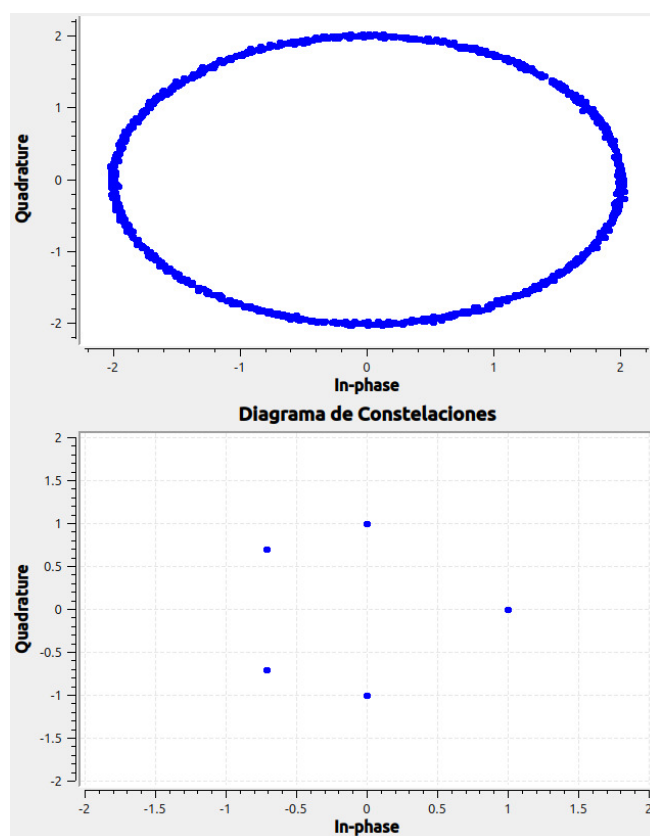


Fig. 9: Constelación 8-PSK

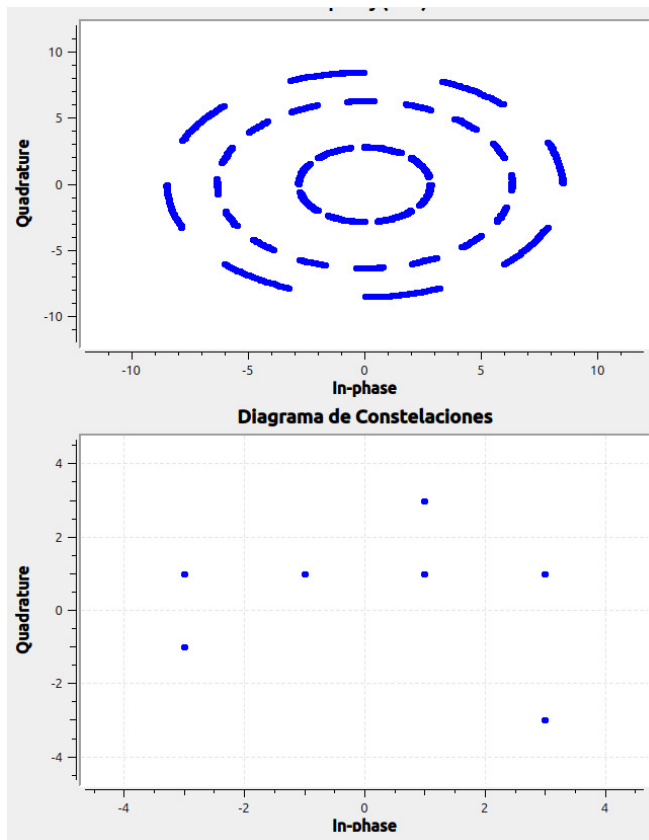


Fig. 10: Constelación 16-QAM

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

En el dominio temporal, la señal muestra cambios simultáneos tanto en la amplitud (envolvente) como en la fase de la portadora, lo que da lugar a una forma de onda más compleja, con variaciones continuas en la amplitud de los pulsos.

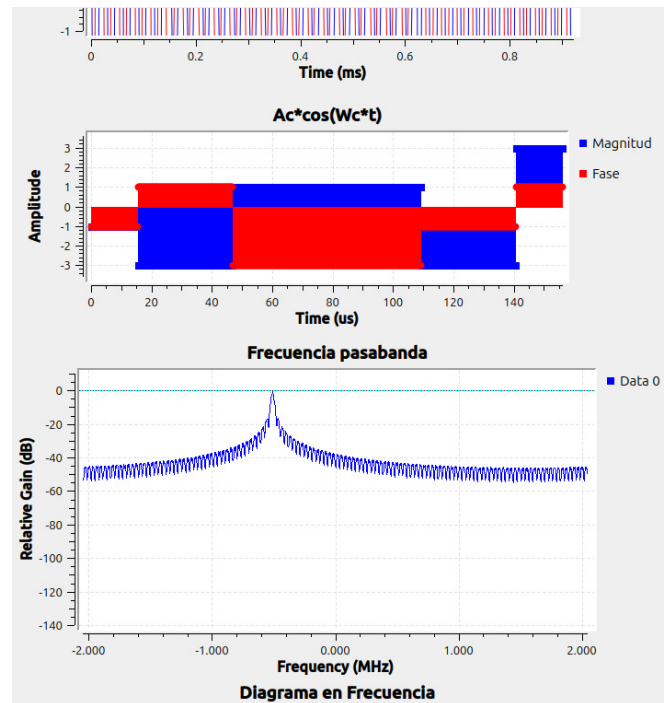


Fig. 11: Enter Caption

La Figura 9 representa la señal 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) modulada en banda pasante. A diferencia de las modulaciones PSK, QAM codifica la información mediante variaciones simultáneas de fase y amplitud, permitiendo la transmisión de 16 símbolos diferentes, lo que equivale a 4 bits por símbolo.

En el dominio temporal, se observan cambios continuos tanto en la amplitud de la envolvente como en la fase de la portadora, lo que produce una forma de onda con mayor complejidad y transiciones más dinámicas en comparación con esquemas de modulación de amplitud constante.

Desde el punto de vista espectral, la señal presenta un ensanchamiento moderado del ancho de banda, efecto asociado al incremento de combinaciones posibles entre fase y amplitud. Su constelación equivalente se representa mediante una matriz de 16 puntos, donde cada uno corresponde a una combinación única de ambos parámetros.

La modulación 16-QAM ofrece un balance favorable entre tasa de transmisión y eficiencia espectral, aunque dicho beneficio conlleva una mayor susceptibilidad al ruido, por lo que requiere condiciones de canal con mejores niveles de relación señal-ruido (SNR).

C. Espectro de Potencia Se realizó el análisis de la densidad espectral de potencia (PSD) de las señales M-QAM, evaluando el ancho de banda que ocupan y com-

parándolo con el comportamiento observado en modulaciones M-PSK.

En la Figura 10 se presenta el espectro en banda pasante de la señal BPSK, donde se evidencia que la mayor parte de la energía se localiza alrededor de la frecuencia portadora, manteniendo una distribución simétrica respecto a su eje central. Debido a que la modulación solo emplea dos estados de fase, su contenido espectral es más concentrado, lo que se traduce en un uso reducido del ancho de banda. Esto reafirma la elevada robustez de BPSK frente a las perturbaciones causadas por el ruido.

La Figura 11 muestra el espectro correspondiente a la señal 16-QAM, la cual incorpora variaciones simultáneas en amplitud y fase. A diferencia de los esquemas PSK, el espectro de QAM presenta un mayor ensanchamiento, lo que evidencia la complejidad de la señal y la coexistencia de múltiples componentes en frecuencia. Aunque esta modulación permite una elevada eficiencia espectral (4 bits por símbolo), su correcto desempeño exige una mayor relación señal-ruido (SNR) para garantizar una transmisión confiable de la información.

4.3. D. Robustez al Ruido

Se añadió ruido AWGN con el fin de analizar la tolerancia al error de cada esquema de modulación, evidenciándose que, para un mismo orden M , las modulaciones M-QAM presentan mayor vulnerabilidad al ruido en comparación con M-PSK. Este efecto puede mitigarse incrementando la separación entre los símbolos de la constelación, lo cual en la práctica equivale a elevar la potencia de transmisión. En consecuencia, los esquemas M-QAM demandan mayores niveles de potencia para garantizar un desempeño equivalente bajo condiciones de ruido.

5. Conclusiones

-El estudio comparativo permitió observar que la modulación BPSK presenta una mayor tolerancia al ruido, debido a la amplia separación entre sus símbolos. Por otro lado, 16-QAM se caracteriza por una mayor eficiencia espectral, al transmitir más bits por símbolo, aunque esto implica una mayor vulnerabilidad frente a interferencias. Este compromiso entre robustez y eficiencia constituye un factor fundamental en el diseño de sistemas de comunicación.

-El análisis en el dominio de la frecuencia evidenció que, al incrementarse el orden de modulación M , el ancho de banda ocupado también aumenta, mientras que la separación entre símbolos dentro de la constelación se

reduce. Esto respalda la relación teórica entre la complejidad de la modulación y su mayor sensibilidad al ruido, lo cual concuerda con los resultados obtenidos experimentalmente en GNU Radio.

-En la Figura 10, correspondiente al espectro de la señal BPSK, se observó una alta concentración de energía alrededor de la frecuencia portadora, reflejando un uso eficiente del ancho de banda. En contraste, en la Figura 11 se evidenció que 16-QAM presenta un espectro más amplio, debido a las variaciones simultáneas de amplitud y fase, lo que permite mayores tasas de transmisión, pero demanda una mejor relación señal-ruido (SNR) para mantener un desempeño adecuado.

-En términos generales, la práctica permitió afianzar los conceptos y aplicaciones de las modulaciones digitales M-PSK y M-QAM, resaltando la importancia del equilibrio entre eficiencia espectral y resistencia al ruido en sistemas de comunicación actuales. Asimismo, se fortaleció el manejo de herramientas de radio definida por software (SDR), aplicadas al análisis y caracterización de señales en escenarios reales.

Teorema de Nyquist [1]. GNU Radio [2] Comunicaciones Digitales basadas en radio definida por software [3] [?]

Referencias

- [1] "Teorema de nyquist." [Online]. Available: <https://techlib.net/techedu/teorema-de-nyquist/>
- [2] "Gnu radio." [Online]. Available: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page
- [3] "Comunicaciones digitales basadas en radio definida por software." [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1fd9M4_bIjwLOajQdkdN9ex2pLYRoXomz/view

article
hyperref