

PRÁCTICA 4: La Modulación de M-PSK

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

19 de Octubre de 2025

Abstract

In this laboratory practice, the necessary blocks were implemented in GNU Radio to generate a M-PSK phase-modulated signal. A truth table was constructed to represent the different modulation symbols and establish their correspondence with the respective phases. Based on this implementation, the requested measurements were performed, including the determination of the bit rate, the power spectral density (PSD), and the constellation diagram of the generated signal.

The experimental results allowed the behaviour of M-PSK modulation to be analysed and its relationship with theory to be verified, observing the shape of the spectrum, the arrangement of symbols in the complex plane, and the influence of noise on the modulated signal. This study facilitates the understanding of the fundamental parameters of digital modulations and their importance in modern communication systems.

Keywords: M-PSK, PSD, constellation diagram.

1. Introducción

En el presente laboratorio se tiene como propósito implementar un sistema de modulación M-PSK utilizando la herramienta GNU Radio, explorando tanto la generación de la señal modulada mediante bloques de software como el análisis de sus propiedades principales. Durante la práctica se busca representar y estudiar los parámetros fundamentales que caracterizan este tipo de modulación, tales como la envolvente compleja, el ancho de banda, la PSD y el diagrama de constelación, con el fin de comprender cómo la variación de los parámetros de modulación influye en el desempeño global del sistema.

Adicionalmente, se realiza una comparación entre la modulación M-PSK y la Q-PSK (Quadrature PSK), con el propósito de analizar sus diferencias en términos de velocidad de símbolos y eficiencia espectral. De esta manera, la práctica permite afianzar los conceptos teóricos abordados en clase y a través de la simulación y análisis de sistemas de comunicación digitales mediante

entornos de desarrollo basados en radio definida por software (SDR).

2. Metodología

Para el desarrollo de la práctica se implementó un sistema de modulación M-PSK en GNU Radio, con el objetivo de analizar el comportamiento de la señal modulada y los parámetros asociados a su desempeño.

En primer lugar, se preparó el entorno de trabajo creando una carpeta específica para el laboratorio dentro del repositorio del curso. Posteriormente, se diseñaron los diagramas de bloques necesarios para generar una señal M-PSK [1], utilizando tanto la implementación mediante un oscilador controlado por voltaje (VCO) como a través de una tabla de verdad programada en un bloque Vector Source.

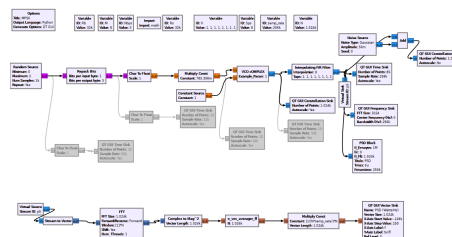


Figure 1: Diagrama de bloques de GNU Radio para resolver la práctica implementando VCO.

En la ilustración 2 se pueden observar los diagramas de bloques realizados en GNU Radio usando la tabla de verdad.

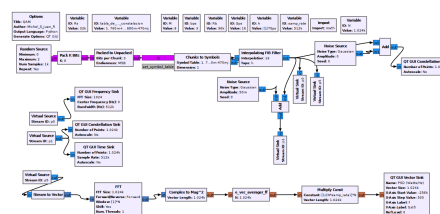


Figure 2: Diagrama de bloques de GNU Radio para resolver la práctica implementando tabla de verdad.

Una vez obtenida la señal modulada, se realizaron mediciones de los parámetros principales del sistema. Se determinó el ancho de banda de la señal, se analizó la densidad espectral de potencia (PSD) y se representaron las componentes en cuadratura para obtener la envolvente compleja. También se construyó el diagrama de constelación correspondiente, verificando la correcta ubicación de los símbolos y su relación con las fases asignadas.

En una segunda parte del laboratorio, se implementó una modulación Q-PSK con el fin de realizar una comparación directa con la M-PSK. A partir de ello, se analizaron las diferencias entre ambas modulaciones en términos de tasa de símbolos, eficiencia espectral y comportamiento frente al ruido, introduciendo un canal aditivo con ruido blanco gaussiano (AWGN) para observar su efecto sobre la constelación.

Finalmente, se elaboró una constelación personalizada para observar la variación del desempeño del sistema al modificar la distribución de los símbolos en el plano complejo. Todos los resultados y capturas fueron documentados en GitHub, con el fin de disponer de la información necesaria para la elaboración del informe correspondiente.

3. Resultados y Análisis de Resultados

3-A. Análisis del espectro y relación con la tasa de símbolos

En la Figura 3 se observa la densidad espectral de potencia de la señal M-PSK obtenida a partir de la envolvente compleja. El espectro se encuentra centrado en frecuencia cero, lo que corresponde a la representación en banda base.

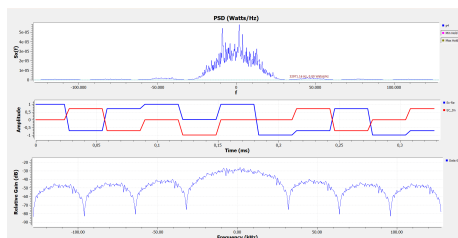


Figure 3: Ancho de banda estimado con la PSD implementando el VCO.

Se aprecia que la mayor concentración de energía se encuentra dentro de un rango aproximado de ± 32 kHz, valor que coincide con la tasa de símbolos configurada en el sistema ($R_s = 32$ k símbolos/s).

Los puntos donde la potencia cae a cero corresponden a las frecuencias de nulidad del espectro. En este

caso, el espectro presenta ceros en torno a ± 32 kHz, ± 64 kHz, ± 96 kHz, etc., lo que confirma que dichas frecuencias son múltiplos enteros de la tasa de símbolos R_s . Este comportamiento concuerda con la teoría de la modulación digital, donde para pulsos rectangulares de duración T el espectro de la señal se asemeja a una función sinc, cuyas nulidades ocurren en:

$$f = kR_s, \quad R_s = \frac{1}{T}, \quad k \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}.$$

Por lo tanto, el ancho de banda de la envolvente compleja puede aproximarse al doble de la tasa de símbolos ($B \approx 2R_s$), mientras que la posición de los ceros en el espectro confirma la relación directa entre la forma temporal de los símbolos y su contenido en frecuencia.

3-B. Implementación mediante Vector Source

Con el fin de verificar que la envolvente compleja puede obtenerse sin recurrir a un modulador predefinido, se reemplazó la tabla de verdad por un bloque *Vector Source (complex)* en GNU Radio. En este bloque se programó un vector que contiene los valores complejos correspondientes a los puntos de la constelación M-PSK, definidos según:

$$s_m = e^{j\frac{2\pi m}{M}}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1$$

De esta forma, cada elemento del vector representa un símbolo en el plano complejo (I,Q), manteniendo el mismo ordenamiento utilizado en la tabla de verdad. Por ejemplo, para una modulación 8-PSK [2], el vector empleado fue:

$$[1 + 0j, 0.707 + 0.707j, 0 + 1j, -0.707 + 0.707j, -1 + 0j, -0.707 - 0.707j, 0 - 1j, 0.707 - 0.707j]$$

El resultado obtenido en la constelación fue equivalente al generado mediante el método del VCO, confirmando que la representación mediante el *Vector Source* produce la misma envolvente compleja. Las gráficas de la señal obtenida se muestran en la Figura 4.

Diagrama de constelación para 8-PSK

Se realizó el análisis del diagrama de constelación de la señal obtenida mediante el uso del bloque *Vector Source* y del oscilador controlado por voltaje (VCO). En ambos casos, se aplicó un ruido gaussiano con una potencia de 50 m, con el propósito de comparar el comportamiento de la modulación bajo las mismas

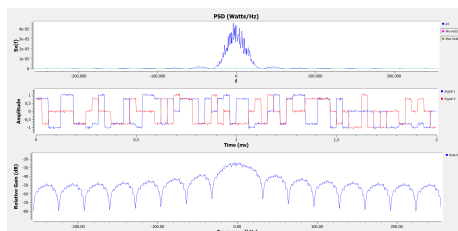


Figure 4: Ancho de banda estimado con la PSD con el vector source.

condiciones. Asimismo, se verificó que ambas implementaciones presentan una respuesta similar como se aprecia en la ilustración 5, lo que confirma la coherencia entre los métodos de modulación utilizados.

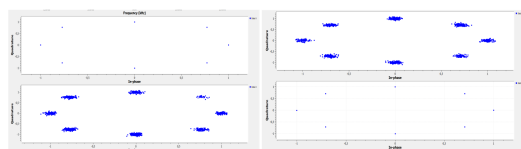


Figure 5: Diagrama de constelación con ruido gaussiano y sin ruido gaussiano.

3-C. Modulación Q-PSK

En esta parte del laboratorio se generó la señal Q-PSK tanto mediante un Vector Source como usando un VCO, y se realizó una comparación de su comportamiento en ambos métodos. Los resultados se muestran en la Figura 6, donde se aprecia la influencia del ruido en la PSD y en la forma temporal de la señal.

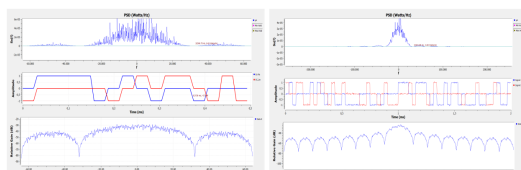


Figure 6: Señal Q-PSK en el dominio del tiempo (I/Q) y su PSD bajo las condiciones de prueba.

El diagrama de constelación resultante es similar en ambos métodos, lo que confirma la coherencia entre la implementación con Vector Source y la basada en VCO. No obstante, al introducir ruido gaussiano se observa una dispersión de los puntos en la constelación, tal como se muestra en la Figura 7.

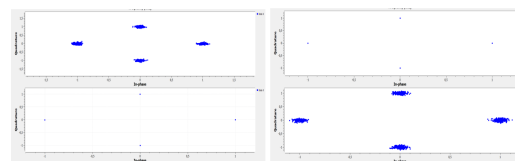


Figure 7: Diagrama de constelación Q-PSK con ruido gaussiano y sin ruido.

La obtención de la envolvente compleja en GNU Radio permite visualizar y analizar modulaciones digitales sin depender de la frecuencia portadora. Al comparar Q-PSK con 8-PSK, se evidencia la relación entre eficiencia espectral y sensibilidad al ruido: 8-PSK ofrece mayor eficiencia espectral (más bits por símbolo) pero menor separación angular entre símbolos, lo que la hace más susceptible a errores en presencia de ruido. Finalmente, el análisis de constelaciones modificadas confirma la importancia de mantener una distribución uniforme y un mapeo coherente de los símbolos para optimizar el rendimiento del sistema.

3-D. Constelación personalizada basada en tabla de verdad

Como parte final de la práctica, se diseñó una constelación personalizada mediante la creación de una tabla de verdad que define los puntos complejos asociados a cada símbolo. En este caso, se partió de una modulación 8-PSK y se modificaron manualmente los ángulos de cada símbolo tomando como referencia el código estudiantil 2214194, con el fin de generar una distribución no uniforme en el plano complejo teniendo en cuenta su fase para hallar los valores complejos aproximados.

La tabla de verdad empleada se muestra en la Tabla I, donde se indica la fase correspondiente a cada combinación binaria.

Table I: Tabla de verdad para la constelación personalizada basada en el código 2214194.

| Símbolo (binario) | Decimal | Fase (rad) | Valor complejo |
|-------------------|---------|------------|-----------------|
| 000 | 0 | 0.0 | $1.00 + j0.00$ |
| 001 | 1 | 0.7 | $0.76 + j0.64$ |
| 010 | 2 | 1.7 | $-0.13 + j0.99$ |
| 011 | 3 | 2.3 | $-0.67 + j0.74$ |
| 100 | 4 | 3.3 | $-0.99 - j0.14$ |
| 101 | 5 | 4.0 | $-0.65 - j0.76$ |
| 110 | 6 | 5.1 | $0.39 - j0.92$ |
| 111 | 7 | 5.8 | $0.88 - j0.47$ |

La constelación generada se implementó en GNU Radio mediante un bloque Vector Source (complex), el cual se conectó a un QT GUI Constellation Sink para su visualización que se puede apreciar en la figura 8.

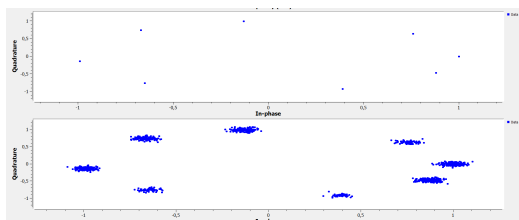


Figure 8: Diagrama de constelación personalizada con ruido gaussiano y sin ruido gaussiano.

Al comparar esta constelación con la M-PSK estándar, se observó que la separación angular irregular entre símbolos afecta la robustez frente al ruido, incrementando la probabilidad de error en los puntos más cercanos. Este ejercicio permitió comprender cómo el diseño geométrico de la constelación influye directamente en el rendimiento del sistema de comunicación.

La envolvente compleja (EC) es la representación baseband de la señal modulada M-PSK, separando sus componentes:

I (en fase) y Q (en cuadratura). Se expresa como:
 $s(t) = I(t) + jQ(t)$

En la siguiente tabla II se puede apreciar ejemplos de vectores y el resultado observado frente a este.

Table II: Tipos de constelación y sus efectos observados

| Tipo de constelación | Ejemplo de vector | Resultado observado |
|--|---|---|
| Rotada 45° | $[e^{j\pi/4}, e^{j3\pi/4}, e^{j5\pi/4}, e^{j7\pi/4}]$ | No altera el BW, pero requiere corrección de fase en recepción. |
| No uniforme (amplitudes distintas) | $[1 + 0j, 0.5 + 0.5j, -0.8 + 0j, 0 - 1j]$ | Diferente energía por símbolo de poder, por desempeño frente a ruido. |
| Ampliada (puntos separados irregularmente) | $[1 + 0j, 0 + 1j, -1 + 0j, 0 - 1j]$ | Menor BER en símbolos más distantes, mayor en los cercanos. |
| Maapeo Gray | Reordenamiento de puntos | Reduce los errores de bit adyacentes. |

4. Conclusiones

- Con lo realizado en la práctica se puede concluir que las dos formas de representar la modulación M-PSK, tanto mediante el uso del bloque Vector Source como con el VCO, son válidas y pueden implementarse adecuadamente para el análisis y la visualización de las modulaciones. Además, se evidenció la influencia del ruido en la señal, observándose la dispersión de los puntos en el diagrama de constelación conforme aumenta el nivel de ruido. Cuando el ruido es bajo, las señales mantienen una amplitud estable y los puntos permanecen agrupados cerca de sus posiciones ideales.
- En la modulación realizada con un nuevo diagrama de constelación, donde se aplicó un desfase a la

señal, se observó que dicho desfase influye negativamente en el comportamiento de la modulación. Este desplazamiento angular genera una mayor dispersión y provoca que el ruido afecte directamente la calidad de la señal transmitida, disminuyendo la precisión en la detección de los símbolos.

- Q-PSK ofrece mayor robustez y menor tasa de error que 8-PSK, aunque esta última transmite más bits por símbolo. Para el mismo ancho de banda, 8-PSK mejora la eficiencia espectral, pero requiere mayor SNR.

Referencias

- [1] H. O. Boada, "Modulación m-psk en gnu radio usando dos métodos: Vco y tabla de verdad," YouTube video, marzo 2024, [Video]. Disponible en: <https://youtu.be/47FUTpV7y4A>. [Online]. Available: <https://youtu.be/47FUTpV7y4A>
- [2] H. O. Boada and O. M. R. Torres, *Comunicaciones digitales basadas en radio definida por software*. Bucaramanga, Colombia: Editorial UIS, 2019. [Online]. Available: <https://sites.google.com/saber.uis.edu.co/comdig>