

# Práctica No.3: DE RADIOFRECUENCIA A LA ENVOLVENTE COMPLEJA (GNURADIO)

Juan Pablo Gamboa Durán - 2210416  
Didier Julián Moreno Ortiz - 2202932  
Karla Vanessa Ruíz González - 2202808

[https://github.com/JuKevCom/Comu2\\_C1\\_judika/tree/Practica\\_3/Practica\\_3](https://github.com/JuKevCom/Comu2_C1_judika/tree/Practica_3/Practica_3)

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

17 de Noviembre de 2024

## Abstract

This report analyzes radiofrequency modulated signals and their conversion to complex envelope using GNURadio. Digital modulations such as OOK, BPSK, and FSK were explored, studying their behavior in the time, frequency, and constellation domains. Flowgraphs were adapted to implement these modulations in both RF and EC, evaluating the impact of parameters such as carrier frequency and frequency deviation. Additionally, blocks like  $e_{RF\_VCO\_ff}$  and  $e_{EC\_VCO\_fc}$  were analyzed to understand their role in the modulation process. This analysis provided a deeper understanding of modulation techniques and their application in communication systems.

**Palabras clave:** Radiofrecuencia, envolvente compleja, diagrama de constelación, OOK, BPSK, FSK.

## I. INTRODUCCIÓN

La representación de señales en términos de su envolvente compleja (EC) sirve para simplificar el análisis y el procesamiento de señales de radiofrecuencia (RF). Este laboratorio tiene como objetivo principal afianzar los conceptos asociados a la conversión de señales moduladas en RF hacia su representación en EC, utilizando herramientas como GNURadio para explorar diversas modulaciones digitales. El enfoque de esta práctica permite estudiar cómo las señales pueden ser procesadas y representadas en el dominio del tiempo, la frecuencia y la constelación, proporcionando una perspectiva integral sobre el comportamiento de modulaciones como OOK, BPSK y FSK. Este análisis no solo facilita la comprensión de las diferencias entre las versiones en RF y en EC, sino que también permite identificar las ventajas operativas de trabajar con la envolvente compleja en aplicaciones prácticas como la detección de patrones de modulación y el diseño de sistemas de comunicación más eficientes.

## II. METODOLOGÍA

Primero, se verifica el funcionamiento del flujograma presentado en la Figura 1 mediante el análisis de una señal modulada OOK en su versión RF y en banda base (EC). Se observa la señal modulada en el dominio del tiempo para comparar las señales I y Q en ambas versiones, y se examina el espectro de la señal modulada en el dominio de la frecuencia. Además, se repite el análisis variando la frecuencia de la portadora, evaluando los cambios en el espectro y las señales moduladas.

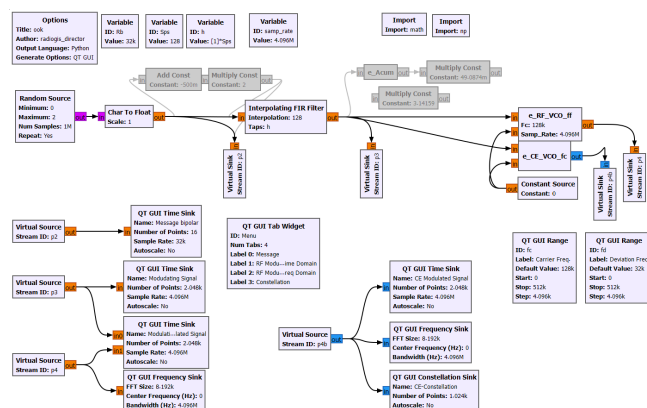


Figura 1. Flujograma para modulación OOK.

A partir del flujograma se analiza el funcionamiento de los bloques  $e_{RF\_VCO\_ff}$  y  $e_{EC\_VCO\_fc}$  para comprender su operación y características principales. Se estudia su implementación y se documenta su propósito, parámetros y recomendaciones de uso.

Posteriormente, se adapta el flujograma para que funcione como un modulador BPSK tanto en su versión RF como en EC (véase Figura 2), y se repiten los análisis realizados con el modulador OOK, evaluando las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia para ambas versiones.

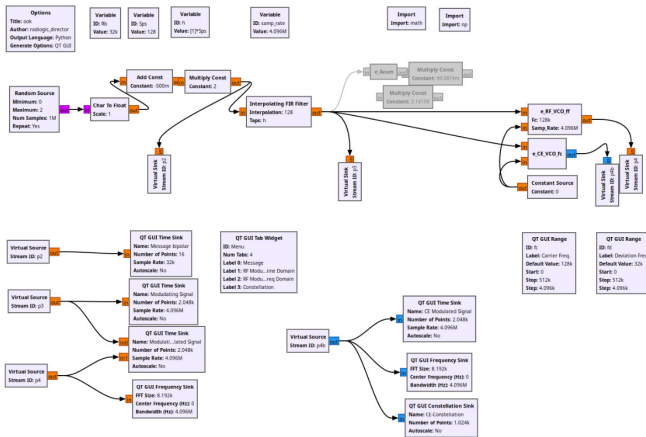


Figura 2. Fugograma para modulación BPSK.

Luego, se vuelve a modificar el flujograma para que funcione como un modulador FSK tanto en su versión RF como en EC (véase Figura 3). Se analizan las señales moduladas en el dominio del tiempo, de la frecuencia y en la constelación, variando la frecuencia de la portadora y manteniendo constante la desviación de frecuencias, y luego manteniendo constante la portadora y variando la desviación.

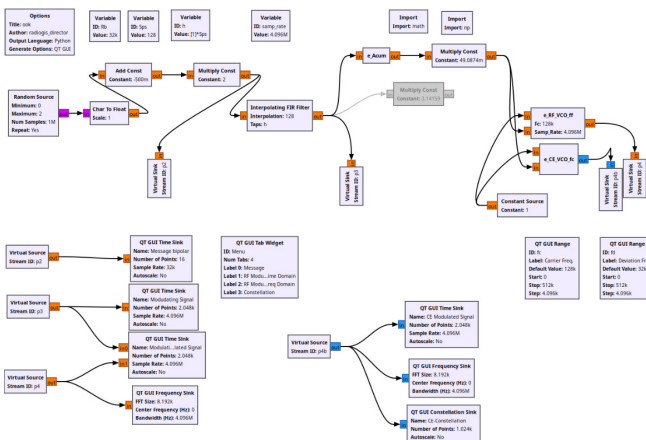


Figura 3. Fugograma para modulación FSK.

Finalmente, se responde una serie de preguntas de control destinadas a profundizar en el análisis del flujograma y su configuración, permitiendo evaluar cómo los diferentes bloques y parámetros afectan la generación y comportamiento de las modulaciones implementadas.

### III. RESULTADOS

En primer lugar, se comprobó el funcionamiento del flujograma propuesto para la práctica, analizando una

señal OOK tanto en versión RF como en EC (Banda base). Para este caso, se tomaron diferentes valores variando la frecuencia de la portadora pero manteniendo constante la desviación de frecuencia en 32kHz. Las representaciones en frecuencia de la modulación OOK se presentan en la Figura 4 y Figura 6, la representación temporal asociada a cada frecuencia de portadora se presentan en la Figura 5 y Figura 7, respectivamente.

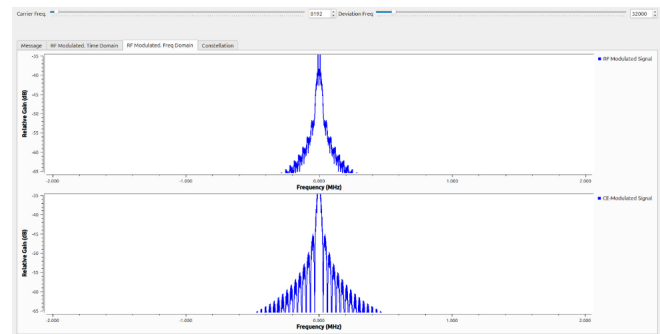


Figura 4. Representación en frecuencia de modulación OOK para una frecuencia portadora de 8.192kHz.

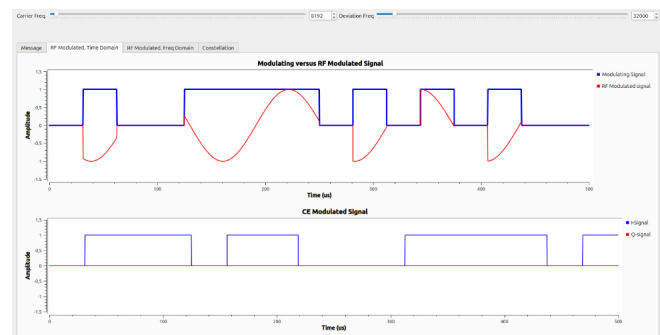


Figura 5. Representación temporal de modulación OOK para una frecuencia portadora de 8.192kHz.

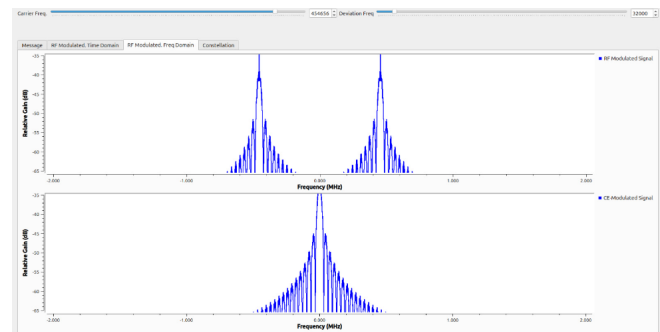


Figura 6. Representación en frecuencia de modulación OOK para una frecuencia portadora de 454.656kHz.

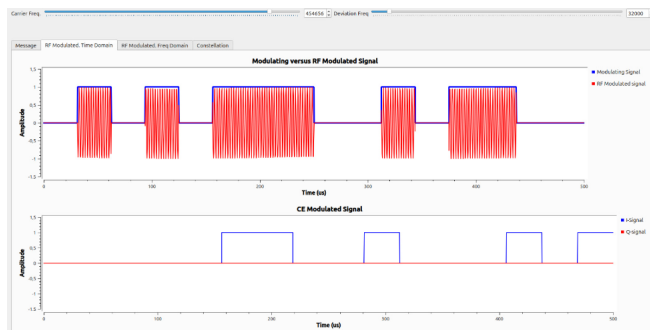


Figura 7. Representación temporal de modulación OOK para una frecuencia portadora de 454.656kHz.

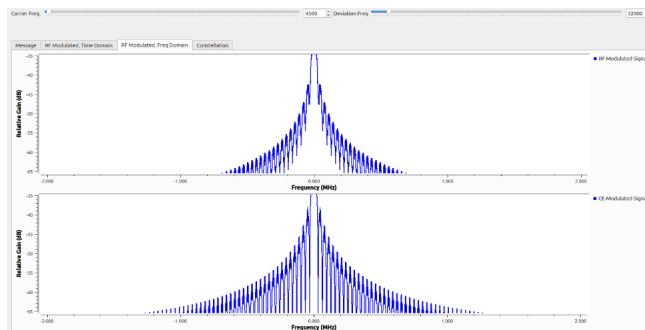


Figura 8. Representación en frecuencia de modulación BPSK para una frecuencia portadora de 4.5kHz.

La principal diferencia entre un modulador OOK en versión RF y en versión EC radica en la presencia de la señal portadora. Mientras que la modulación RF utiliza una portadora de alta frecuencia para transmitir la señal modulada, la versión EC elimina la portadora, representando la señal en términos de sus componentes en fase y en cuadratura [1].

Para esta práctica, fue esencial entender el funcionamiento de los bloques  $e_{RF\_VCO\_ff}$  y  $e_{EC\_VCO\_fc}$ . El bloque  $e_{EC\_VCO\_fc}$  actúa como un oscilador controlado por voltaje (VCO) en banda base, definido en una clase que hereda de  $gr.sync\_block$ . Este bloque procesa señales de entrada de tipo *float32* (amplitud y fase) y genera una señal compleja (*complex64*) en el método *work*, calculando la salida como el producto de la amplitud y el exponencial complejo de la fase. El bloque  $e_{RF\_VCO\_ff}$  genera una señal de radiofrecuencia (RF) a partir de señales de entrada de amplitud y fase. También definido en una clase que hereda de  $gr.sync\_block$ , este bloque permite ajustar la frecuencia portadora y la tasa de muestreo. En el método *work*, se procesan las señales de entrada para generar la señal modulada, asegurando continuidad temporal mediante un contador interno. La salida se calcula multiplicando la amplitud por el coseno de una expresión que incluye la frecuencia portadora, los índices de muestras y la fase.

En la segunda parte práctica, se comprobó el funcionamiento del flujograma modificado para permitir la modulación BPSK en versión RF y EC. De manera similar a la modulación OOK, se tomaron diferentes valores variando la frecuencia de portadora. Las representaciones en frecuencia de la modulación OOK se presentan en la Figura 8 y Figura 10, la representación temporal asociado a cada frecuencia de portadora se presentan en la Figura 9 y Figura 11, respectivamente.

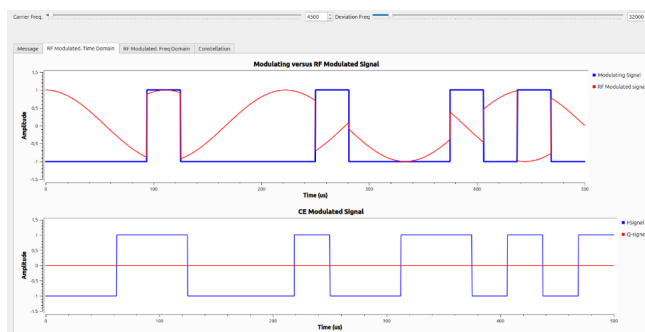


Figura 9. Representación temporal de modulación BPSK para una frecuencia portadora de 4.5kHz.

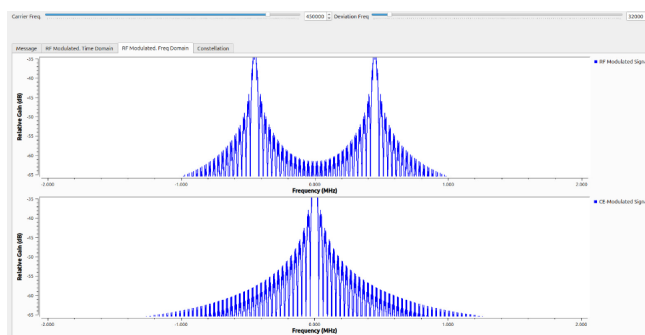


Figura 10. Representación en frecuencia de modulación BPSK para una frecuencia portadora de 450kHz.

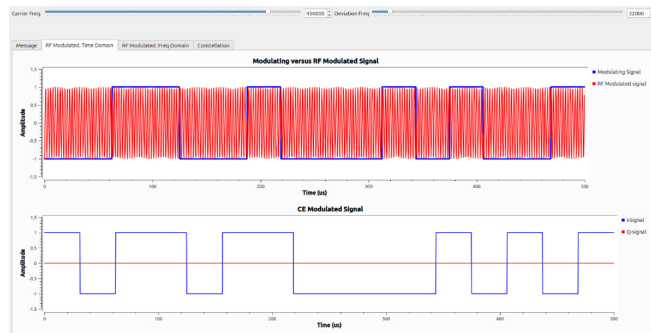


Figura 11. Representación temporal de modulación BPSK para una frecuencia portadora de 450kHz.

Analizando de manera general las gráficas proporcionadas para la modulación BPSK se logra observar que en el dominio de la frecuencia, la señal RF muestra un espectro centrado alrededor de la frecuencia portadora, mientras que la señal EC tiene un espectro simétrico alrededor de la frecuencia base, sin incluir una portadora explícita. En el dominio del tiempo, la señal RF incluye la portadora modulada con transiciones de fase conforme se alternan los valores del mensaje (0 y 1), mientras que la EC presenta únicamente los componentes en fase y en cuadratura, sin presencia de la portadora.

En la tercera parte práctica, se comprobó el funcionamiento del flujograma modificado para permitir la modulación FSK en versión RF y EC. De manera similar a las modulaciones presentadas anteriormente, se tomaron diferentes valores variando la frecuencia de portadora y la desviación de frecuencia. Las representaciones en frecuencia para la modulación FSK cambiando la desviación de frecuencia se presentan en la Figura 12 y Figura 14, sus respectivas representaciones temporales se presentan en la Figura 13 y Figura 15.

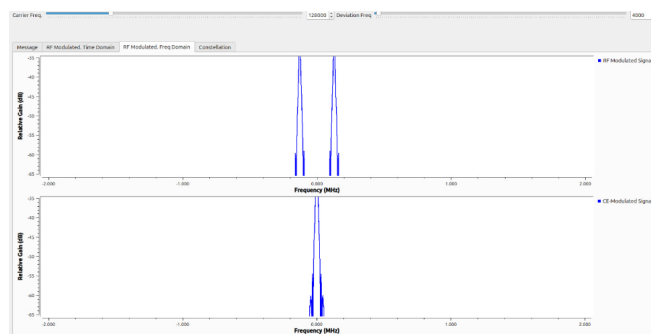


Figura 12. Representación en frecuencia de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 128kHz y una desviación de frecuencia de 4kHz

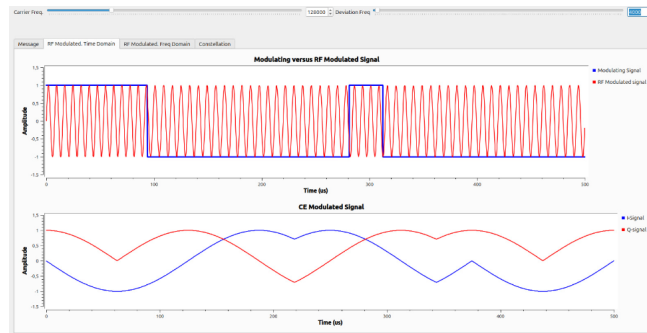


Figura 13. Representación temporal de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 128kHz y una desviación de frecuencia de 4kHz

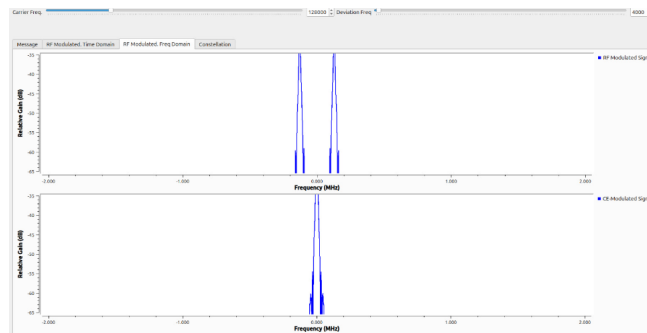


Figura 14. Representación en frecuencia de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 128kHz y una desviación de frecuencia de 400kHz

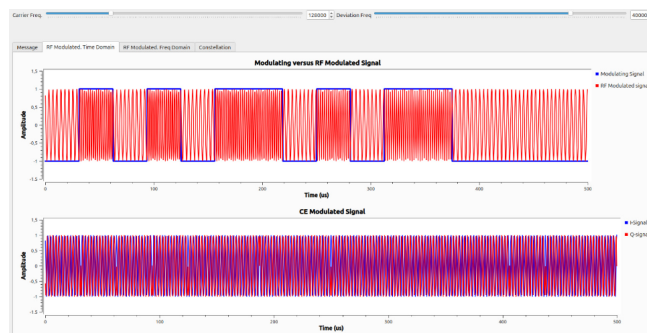


Figura 15. Representación temporal de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 128kHz y una desviación de frecuencia de 400kHz

Las representaciones en frecuencia para la modulación FSK cambiando la frecuencia de portadora se presentan en la Figura 16 y Figura 18, sus respectivas representaciones temporales se presentan en la Figura 17 y Figura 19.

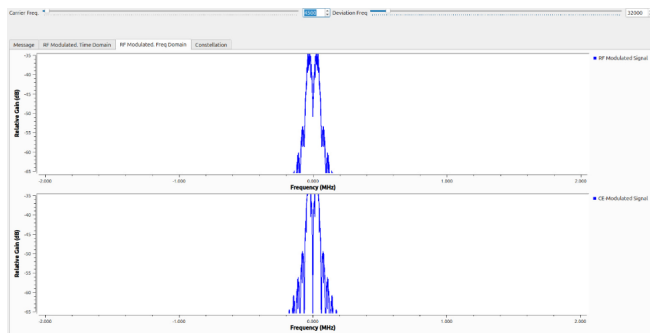


Figura 16. Representación en frecuencia de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 4.5kHz y una desviación de frecuencia de 32kHz

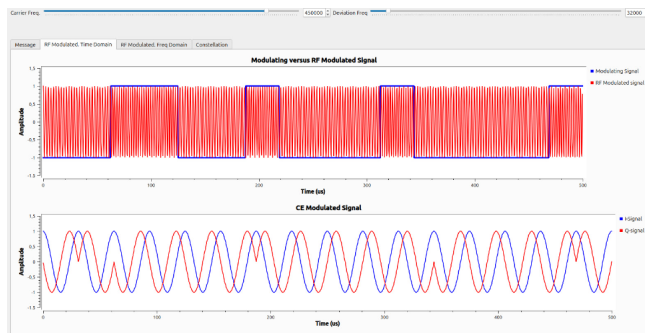


Figura 19. Representación temporal de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 450kHz y una desviación de frecuencia de 32kHz

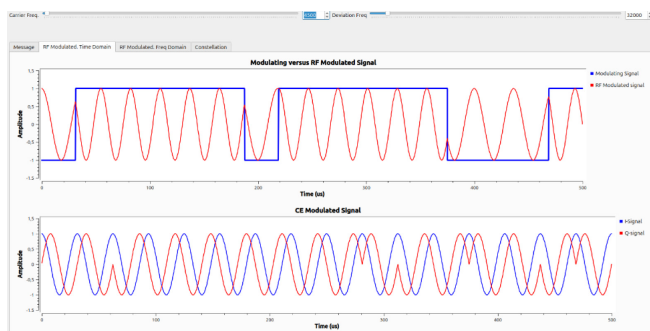


Figura 17. Representación temporal de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 4.5kHz y una desviación de frecuencia de 32kHz

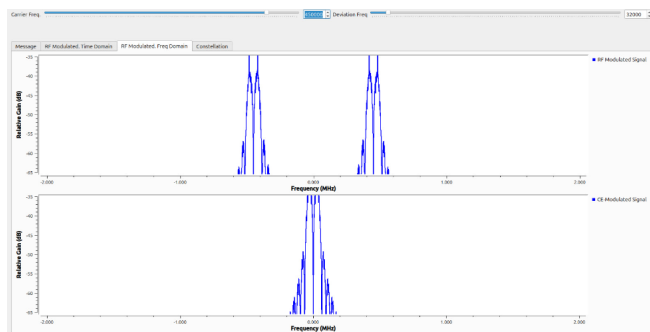


Figura 18. Representación en frecuencia de la modulación FSK para una frecuencia de portadora de 450kHz y una desviación de frecuencia de 32kHz

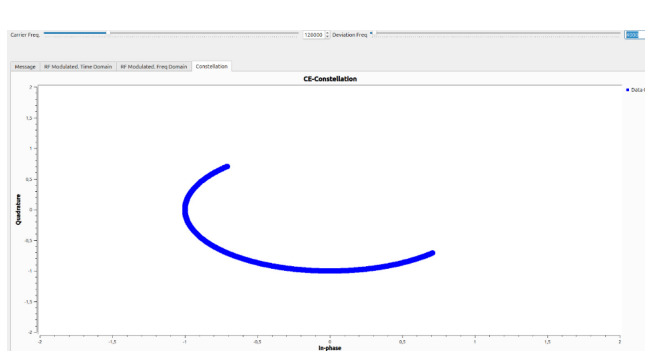


Figura 20. Representación de constelación FSK para una frecuencia de portadora de 128Khz y una desviación de frecuencia de 4kHz.

Para que los VCO produzcan una señal con modulación FSK, es esencial acondicionar la señal de entrada adecuadamente. En la versión RF, la señal debe ser filtrada para eliminar ruidos y ajustada en amplitud para que el VCO pueda responder correctamente a las variaciones de voltaje. En la versión EC, se debe asegurar que la señal de entrada esté libre de distorsiones y que su frecuencia esté dentro del rango operativo del VCO.

Para la frecuencia portadora, se puede proponer un valor de 10 MHz, que es común en aplicaciones de comunicación. En cuanto a la desviación de frecuencias, un valor de 50 kHz podría ser adecuado para minimizar el solapamiento del espectro, permitiendo una clara distinción entre los estados de frecuencia. Este ajuste asegura que las señales moduladas se mantengan dentro de un rango manejable y que el espectro resultante sea eficiente y libre de interferencias significativas.

Finalmente, para esta última parte, se analizó el comportamiento de la FSK en su forma de constelación cambiando el valor de la desviación de frecuencia. Las representaciones de las constelaciones se presentan en la Figura 20 y Figura 21



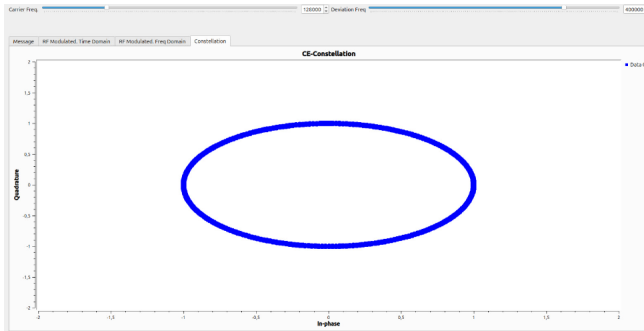


Figura 21. Representación de constelación FSK para una frecuencia de portadora de 128Khz y una desviación de frecuencia de 400kHz.

Para determinar si el valor de SPS es apropiado al generar la versión paso-bandas de una modulación, se debe asegurar que al menos un ciclo de portadora ocurra durante la transmisión de cada bit. Si el bloque *Multiply Const* en la modulación BPSK se configura con el valor 1, los valores de amplitud originales (-0.5, 0.5) se mantienen, siendo equivalente a eliminar el bloque. El bloque *Constant Source* se configura en cero para la modulación OOK, pero no para BPSK y FSK, porque en FSK se necesita una amplitud constante mientras se cambia la fase, mientras que en OOK y BPSK solo se desea cambiar la amplitud. En la modulación OOK, la señal modulante entra por la primera entrada de los VCO, mientras que en FSK entra por la segunda entrada debido a la necesidad de un cambio en frecuencia. En BPSK, el bloque *Interpolating FIR Filter* ya está ubicado antes de los VCO desde el inicio. En FSK, no es posible reubicar este bloque antes de los VCO ya que se perdería la parte integradora. Para el caso FSK, el valor máximo permitido para la frecuencia de la portadora debe estar entre 2000 y 65536. En BPSK, el valor mínimo de SPS necesario para generar la versión en RF es 32.

#### IV. CONCLUSIONES

En esta práctica se logró una comprensión detallada de las señales moduladas tanto en versión de radiofrecuencia (RF) como en envoltura compleja (EC), observando sus diferencias clave. En particular, se destacó cómo la modulación en RF utiliza una portadora de alta frecuencia para transmitir la señal modulada, mientras que la versión EC elimina la portadora, representando la señal mediante sus componentes en fase y cuadratura. Este enfoque permite una mayor simplicidad en el procesamiento y análisis de las señales, facilitando su interpretación, especialmente en aplicaciones de comunicaciones digitales como OOK, BPSK y FSK.

Las pruebas realizadas con variaciones en la frecuencia de la portadora y la desviación de frecuencia

mostraron cómo estos parámetros afectan tanto al comportamiento en el dominio temporal como en el de frecuencia. Asimismo, las pruebas en el dominio de la constelación también fueron importantes para observar cómo las variaciones en la desviación de frecuencia impactan la representación visual de la señal.

Además, el análisis de los bloques *e\_RF\_VCO\_ff* y *e\_EC\_VCO\_fc* proporcionó una comprensión sobre el funcionamiento de los osciladores controlados por voltaje (VCO) en ambas representaciones. Estos bloques fueron esenciales para generar señales moduladas en RF y EC, ajustando correctamente los parámetros como la frecuencia portadora y la tasa de muestreo.

#### REFERENCIAS

- [1] H. Ortega and Ó. Reyes, *Comunicaciones Digitales basadas en radio definida por software*. Editorial UIS, 2019.