



Práctica 3

De Radiofrecuencia a la Envolvente Compleja

Carlos Fernando Carreño Jerez - 2201729 ✕

Juan Esteban Pinto Orozco - 2215585

Jose David Florez Ramos - 2174241

https://github.com/CMarsJ/CommunicationsII_2024_2_CFJPDF

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

18 de Noviembre de 2024

abstract

In this practice, the principles of modulation and demodulation of radio frequency (RF) signals and their representation by means of the complex envelope (CE) were explored. Digital modulations such as OOK, BPSK and FSK were analyzed, studying their characteristics in baseband and passband, as well as their behavior in the time, frequency and constellation diagram domains. During the tests, the effects of adjustments in the carrier frequency and frequency deviation were observed, highlighting the differences between RF and CE representations. This study allowed to understand how the parameters of the signals influence their performance and visual representation.

Keywords: modulation, demodulation, OOK, BPSK, FSK, complex envelope, digital communications.

1. Introducción

En los sistemas de comunicaciones, la modulación y el análisis de señales son fundamentales para diseñar transmisiones eficientes y precisas. La representación de señales de radiofrecuencia (RF) mediante la envolvente compleja (EC) simplifican su procesamiento y análisis, permitiendo identificar eventos significativos, como cambios abruptos y patrones de modulación. Este informe explora la aplicación de las modulaciones digitales como OOK, BPSK y FSK utilizando herramientas como GNU Radio, las cuales facilitan un análisis detallado del comportamiento de las señales y la configuración de bloques clave en dichos sistemas. Este trabajo presenta una metodología que abarca desde la gestión y organización de recursos hasta el análisis y adaptación de flujogramas para diferentes tipos de modulación, evaluando su desempeño en diversos dominios. Esta práctica busca no solo aplicar conceptos teóricos, sino

también desarrollar habilidades prácticas para optimizar y ajustar modulaciones en sistemas reales, fomentando una comprensión integral de las señales en sus representaciones de RF y EC.

2. Metodología

En el marco de este laboratorio se busca afianzar los conceptos y habilidades en el uso de GNU Radio para la generación y manipulación de señales en sus representaciones RF y EC, mediante la creación de flujogramas específicos para modulaciones digitales como OOK, BPSK y FSK. A lo largo del proceso, se desarrollarán competencias en la adaptación y evaluación de bloques funcionales, observación de señales en distintos dominios y análisis de las diferencias clave entre las representaciones de modulación en RF y en EC. [1]

1. Se evaluó el funcionamiento del flujograma analizando una señal OOK en sus versiones RF y EC en GNU Radio. Mediante observaciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia, y variaciones en la frecuencia de la portadora, se documentaron las diferencias en el comportamiento de la señal en ambas representaciones.
2. Se estudió el funcionamiento de los bloques e_RF_VCO_ff y e_EC_VCO_fc, examinando sus códigos en Python. Posteriormente, se creó una guía mediante comentarios en el código de ayuda que explica el propósito, parámetros y recomendaciones de uso para cada bloque.
3. El flujograma fue modificado para permitir la modulación BPSK en versiones RF y EC. Se realizaron pruebas comparativas entre OOK y BPSK, documentando las diferencias observadas entre ambas modulaciones en términos de rendimiento y representación.



4. Se ajustó el fluograma para implementar la modulación FSK en RF y EC, observando la señal en el dominio del tiempo. Se realizaron pruebas variando la frecuencia de la portadora y la desviación de frecuencia, identificando los cambios necesarios para que el VCO genere una señal FSK adecuada.
5. Se repitieron las pruebas de FSK observando la señal en el dominio de frecuencias, analizando el espectro para identificar valores óptimos de frecuencia de portadora y desviación que minimicen el solapamiento y mejoren la claridad de la señal.
6. Se realizaron observaciones de la señal modulada FSK en la constelación, documentando la representación gráfica y las características particulares de esta modulación en dicho dominio, lo cual facilita la comprensión visual de la estructura de la señal.
7. Finalmente, se respondieron preguntas de control para afianzar los conceptos adquiridos, evaluando aspectos clave de los bloques y configuraciones utilizados, así como la teoría subyacente de las modulaciones y el comportamiento de las señales en los diferentes dominios.

3. Resultados y Análisis de Resultados

A continuación, Se presentan los resultados del análisis de modulaciones digitales en GNU Radio, evaluando sus representaciones en radiofrecuencia (RF) y envolvente compleja (EC). Las observaciones realizadas en distintos dominios permiten comparar el rendimiento y entender las diferencias prácticas de cada modulación en aplicaciones de comunicación.

Comprobación del fluograma analizando una señal OOK

Se analizó el comportamiento del fluograma propuesto como modulador OOK, considerando tanto su representación RF como EC. El análisis se enfocó en observar las características de las señales en los dominios del tiempo y la frecuencia ante variaciones en la frecuencia de la portadora.

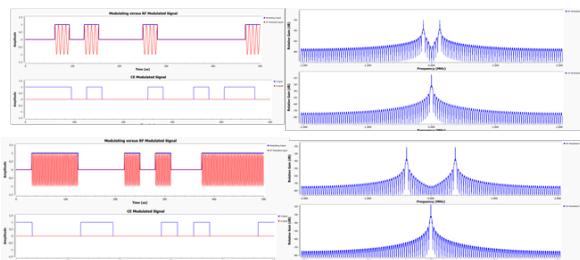


Figura 1: Modulación OOK en RF y EC con $F_c=128\text{KHz}$ y $F_c=384\text{KHz}$ respectivamente.

A partir de los análisis correspondientes, se puede evidenciar que la principal diferencia entre un modulador OOK en versión RF y en versión EC radica en cómo se representan y procesan las señales. En el dominio del tiempo, la versión RF incluye explícitamente la portadora, visible como una oscilación sinusoidal cuya "densidad" depende de la frecuencia de la portadora, alternando entre encendida y apagada según la señal moduladora. En contraste, la versión EC elimina la portadora y solo muestra la amplitud de la señal en banda base, simplificando su interpretación. En el dominio de la frecuencia, la señal RF presenta un espectro centrado en la frecuencia de la portadora con armónicos generados por las transiciones de encendido y apagado, mientras que la versión EC traslada el espectro a banda base (0 Hz), facilitando el análisis y procesamiento digital sin depender de la frecuencia de la portadora. Ambas representaciones son equivalentes en información, pero optimizadas para diferentes etapas del sistema de comunicación.

Análisis de bloques VCO

A continuación, se evidencia el análisis sobre el código en los 2 bloques correspondientes, "e_RF_VCO_ff" y "e_EC_VCO_fc" evidenciando que en estos poseen dos entradas, una correspondientes a la Fase Q[1] y la otra a la Amplitud A[0] de la señal, obteniendo a su salida la señal modulada y[0].

```

1 import numpy as np #Biblioteca para operaciones matemáticas
2 from gnuradio import gr #Procesamiento de Señales en GNU Radio
3 import math # Biblioteca funciones matemáticas básicas como trigonometría.
4 class blk(gr.sync_block): #Definición de la clase del bloque
5     """Este bloque implementa un VCO (Voltage-Controlled Oscillator) de RF.
6     Genera una señal sinusoidal modulada en fase y amplitud."""
7     def __init__(self, fc=128000, samp_rate=320000): #Declaración del Bloque
8         """ Inicialización del bloque. fc: frecuencia portadora (default 128000
9         Hz). samp_rate: tasa de muestreo (default 320000 muestras(seg))."""
10        gr.sync_block.__init__( self,
11            name='e_RF_VCO_ff', #Nombre interno del bloque.
12            in_sig=[np.float32, np.float32],#Dos entradas:Amplitud (A) y Fase (Q)
13            out_sig=[np.float32] #Una salida: señal modulada.
14        )
15        # Almacena los valores predeterminados de frecuencia y tasa de muestreo
16        self.fc = fc # Frecuencia portadora (Default).
17        self.samp_rate = samp_rate # Tasa de muestreo.
18        self.n_m = 0 # Contador interno para el índice de muestra, inicializado
19        en 0.
20    def work(self, input_items, output_items):
21        """ Este método define el procesamiento principal del bloque.
22        Recibe las entradas, realiza los cálculos y genera las salidas. """
23        # Acceso a las entradas
24        A = input_items[0] # Entrada 0: Amplitud (arreglo de valores tipo
25        float32).
26        Q = input_items[1] # Entrada 1: Fase (arreglo de valores tipo float32).
27        # Acceso a la salida
28        y = output_items[0] # Salida 0: señal modulada.
29        # Número de muestras en la entrada
30        N = len(A) # Tamaño de la entrada de amplitud.
31        # Generación de un índice de tiempo discreto (vector 'n')
32        n = np.linspace( # Valor inicial del índice (contador interno).
33                         self.n_m, # Valor final (actual + número de muestras - 1).
34                         N # Número de puntos en el vector.
35        )
36        # Actualización del contador interno
37        self.n_m += N # Incrementa el índice de muestra.
38        # Cálculo de la salida
39        # Salida es una señal sinusoidal modulada en amplitud (A) y fase (Q):
40        # y = A*cos(2*math.pi*fc * n / samp_rate + Q)
41        y = A*np.cos(2 * math.pi * self.fc * n / self.samp_rate + Q)
42        # Retorna el número de elementos generados en la salida
        return len(output_items[0])
    
```

Help 1: Código del Bloque e_RF_VCO_ff.



```

1 import numpy as np # Importa la biblioteca numpy para operaciones numéricas
2 from gnuradio import gr # Procesamiento de Señales en GNU Radio
3 import math #Biblioteca funciones matemáticas básicas como trigonometría.
4 class blk(gr.sync_block): #Definición de la clase del bloque
5     """Este bloque implementa un VCO (Oscilador Controlado por Voltaje) en
6     baseband (banda base). Toma una señal de entrada en forma de amplitud y
7     fase, y genera una señal de salida compleja."""
8     def __init__(self): # Constructor del bloque
9         # Llama al constructor de la clase base para inicializar el bloque.
10        gr.sync_block.__init__(
11            self,
12            name='e_EC_VCO_fc', # Nombre del bloque.
13            in_sig=[np.float32, np.float32], # Define las señales de entrada:
14            out_sig=[np.complex64] # Define la señal de salida: un array de nú-
15            meros complejos (complex64).
16        )
17        # Método que realiza la operación principal del bloque.
18        # Se llama automáticamente cada vez que hay datos disponibles en las entradas
19        def work(self, input_items, output_items):
20            # Asigna la primera entrada (input_items[0]) a 'A', que representa la
21            # amplitud de la señal.
22            A = input_items[0] # Array de amplitudes.
23            # Asigna la segunda entrada (input_items[1]) a 'Q', que representa la
24            # fase de la señal.
25            Q = input_items[1] # Array de fases.
26            # Asigna el buffer de salida (output_items[0]) a 'y'.
27            y = output_items[0] # Array donde se escribirá la salida compleja.
28            # Calcula el tamaño del array de amplitudes, asumiendo que las entradas
29            # tienen la misma longitud.
30            N = len(A)
31            # Genera la señal de salida compleja. Esto se hace multiplicando la
32            # amplitud (A)
33            # por un exponente complejo que contiene la fase (Q). La expresión 'np.
34            exp(1j * Q)'
35            # genera la parte compleja usando la fórmula de Euler: e^(j*Q) = cos(Q) +
36            j*sin(Q).
37            y[:] = A * np.exp(1j * Q) # Genera la envolvente compleja.
38            # Devuelve la cantidad de muestras procesadas, que es el tamaño del
39            # buffer de salida.
40            return len(output_items[0]) #Salida
    
```

Help 2: Código del Bloque e_EC_VCO_fc.

Adaptación del flujograma para modulación BPSK

Se llevó a cabo un análisis del comportamiento del modulador BPSK, desarrollado tras realizar las modificaciones necesarias al flujograma inicial. A partir de este modulador, se visualizaron tanto la representación en RF como la envolvente compleja (EC) de la señal BPSK. El estudio se centró en examinar las características de las señales en los dominios del tiempo y la frecuencia, considerando las variaciones en la frecuencia de la portadora.

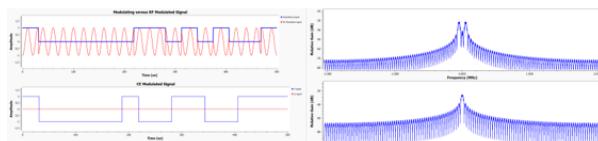


Figura 2: Modulacion BPSK en RF y EC para Fc=50KHz.

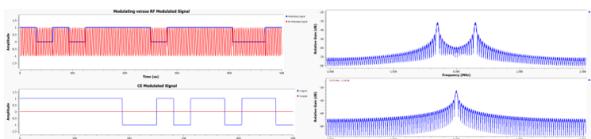


Figura 3: Modulacion BPSK en RF y EC para Fc=300KHz

Un modulador BPSK en versión RF y en versión EC se diferencian principalmente en cómo representan y procesan la señal. En la versión RF, la señal incluye explícitamente la portadora sinusoidal, cuya frecuencia define la densidad de oscilaciones visibles en el dominio del tiempo. Los cambios de fase característicos del BPSK (0° a 180°) se reflejan como inversiones en la fase de la onda sinusoidal (Portadora), sincronizados con las transiciones de la señal moduladora (mensaje). En el dominio de la frecuencia, el espectro de la señal RF está centrado en la frecuencia de la portadora (50 kHz o 300 kHz según las gráficas ilustradas), con componentes adicionales generadas por las transiciones de fase. En cambio, en la versión EC, la portadora desaparece y la señal se representa en banda base mediante las componentes I y Q. En el dominio de la frecuencia, la señal EC se centra en 0 Hz, lo que simplifica el análisis y el procesamiento digital al no depender de la portadora. La versión RF es adecuada para la transmisión física, mientras que la versión EC facilita simulaciones y análisis en sistemas digitales, al eliminar la complejidad asociada a la portadora.

Adaptación del flujograma para modulación FSK

Se llevó a cabo un análisis del comportamiento del modulador FSK, desarrollado tras implementar las modificaciones necesarias en el flujograma previamente trabajado. Para estas modificaciones.

La señal de entrada fue escalada adecuadamente para que el VCO reconozca los valores y pueda modular la frecuencia en función de ellos, pasando de un formato unipolar a bipolar. Este ajuste se realizó utilizando los bloques Add Const y Multiply Const, los cuales modifican la amplitud y el nivel de la señal moduladora, asegurando que la salida del VCO varíe entre las frecuencias deseadas. Para mejorar la calidad de la señal antes de ingresar al VCO, se empleó un filtro de interpolación, como el Interpolating FIR Filter, que suaviza las transiciones abruptas y evita ruido o distorsiones, aumentando la resolución temporal de la señal moduladora. Además, el bloque e_ACUM acumula la señal interpolada para generar un desfase progresivo en el tiempo, mientras que Multiply Const escala este desfase, permitiendo que las desviaciones de frecuencia de la portadora reflejen con precisión los niveles de la señal moduladora. Esto garantiza una modulación FSK más estable y precisa.

En el primer escenario de análisis se varió la frecuencia de la portadora, pero la desviación de frecuencia se mantiene constante, como se puede apreciar a continuación.

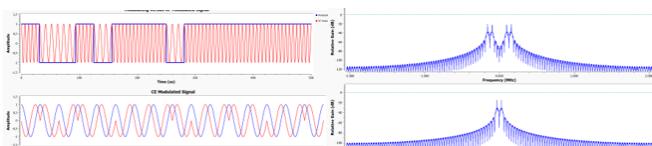


Figura 4: Modulacion FSK $F_c=128\text{KHz}$ y $F_d=\text{cte}$

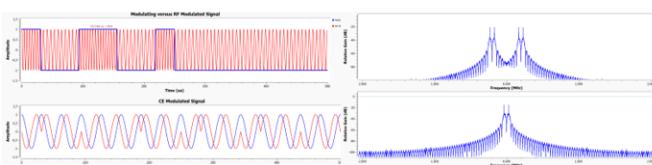


Figura 5: Modulacion FSK $F_c=200\text{KHz}$ y $F_d=\text{cte}$

Cuando la frecuencia de la portadora varía pero la desviación de frecuencia permanece constante, el comportamiento de la señal modulada en RF refleja el desplazamiento de la portadora hacia una nueva frecuencia base, mientras que las transiciones entre los niveles lógicos "0" y "1" permanecen similares en claridad. En el dominio del tiempo, una frecuencia portadora más alta (200 kHz) resulta en una mayor densidad de ciclos sinusoidales en RF, mientras que en EC las oscilaciones permanecen inalteradas, ya que la desviación de frecuencia fija mantiene la misma dinámica en banda base. En el dominio de la frecuencia, el espectro en RF se desplaza proporcionalmente con la frecuencia de la portadora, mientras que en EC el espectro se conserva alrededor de ± 32 kHz, independientemente de la frecuencia de la portadora. Esto resalta que el cambio en la frecuencia de la portadora afecta principalmente la posición del espectro en RF, pero no altera la representación en banda base ni las características de la desviación de frecuencia.

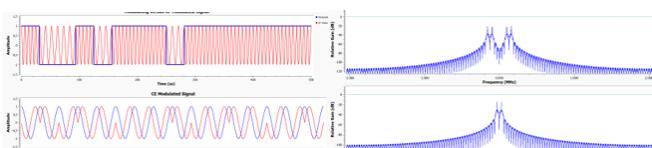


Figura 6: Modulacion FSK $F_c = \text{cte}$ y $F_d = 32\text{KHZ}$

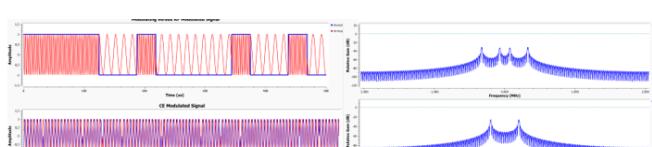


Figura 7: Modulación FSK $F_c = \text{cte}$ y $F_d = 200\text{KHZ}$

Cuando la frecuencia de la portadora es constante y la desviación de frecuencia varía en una señal FSK, se producen cambios significativos en RF y EC tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En RF, un incremento en la desviación de frecuencia aumenta la oscilación de la portadora durante la transmisión de un bit, lo que hace que las transiciones entre los estados lógicos "0" y "1" sean más notorias en el dominio del tiempo (Según si el valor aumenta o disminuye). En EC, la mayor desviación de frecuencia incrementa la diferencia entre las frecuencias de las oscilaciones en banda base para cada estado lógico, lo que se traduce en transiciones más pronunciadas entre los niveles de la señal moduladora. En el dominio de la frecuencia, una desviación baja (32 kHz) genera picos espectrales más cercanos, dificultando la diferenciación de los niveles lógicos, mientras que una desviación alta (200 kHz) separa significativamente los picos espectrales, mejorando la discriminación entre los bits, aunque requiriendo un mayor ancho de banda.

Observaciones en el dominio de frecuencias para FSK

Durante las pruebas, se observó que la frecuencia de la portadora no afecta la estabilidad de la envolvente compleja (EC), pero sí influye en la separación de los picos principales en radiofrecuencia (RF). Con frecuencias de portadora bajas, los picos se aproximan, dificultando su distinción, mientras que con frecuencias más altas, los picos se separan, mejorando su claridad. En cuanto a la desviación de frecuencia, un aumento inicial incrementa la separación entre los picos, pero un aumento excesivo provoca un desplazamiento en frecuencia y una disminución de la ganancia, manteniendo la forma de la señal. Se concluye que la menor interferencia y mejor separación se logra con una frecuencia de portadora de 225,000 Hz y una desviación de 454,000 Hz, donde los cuatro picos se observan claramente y sin distorsiones.

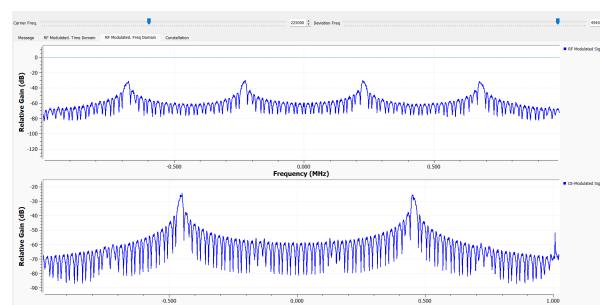


Figura 8: Modulación ESK $F_c=225\text{KHz}$ y $F_d=454\text{KHz}$



Observaciones en la constelación para FSK

En este análisis, se examinó el comportamiento del diagrama de constelación de una señal modulada en FSK bajo dos escenarios diferentes. En primer lugar, se estudió cómo variaba el diagrama al modificar la frecuencia de la portadora, manteniendo constante la desviación de frecuencia. Posteriormente, se analizó el efecto de cambiar la desviación de frecuencia mientras se mantenía fija la frecuencia de la portadora. Este estudio permitió observar cómo estos parámetros influyeron en la distribución de los puntos en el diagrama de constelación, proporcionando una comprensión más profunda sobre el mismo.

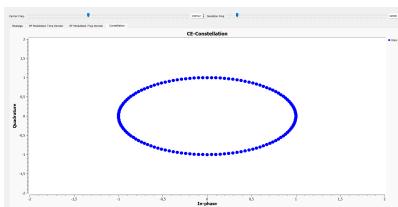


Figura 9: Constelacion FSK Fc=Variable y Fd=cte

Se concluye que el diagrama de constelación en envolvente compleja (EC) es independiente de la frecuencia de la portadora, ya que esta representación opera en banda base y se ve influenciada únicamente por la desviación de frecuencia y la relación entre las frecuencias de los estados lógicos. Esto demuestra que las variaciones en la frecuencia de la portadora no afectan la estabilidad ni la distribución de los puntos en el diagrama de constelación.

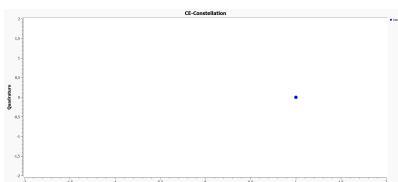


Figura 10: Constelacion FSK Fc=128KHz y Fd=0

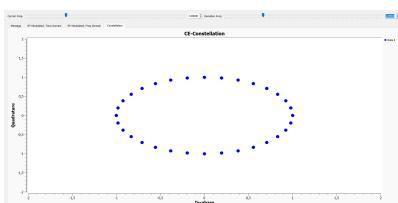


Figura 11: Constelacion FSK Fc=128KHz y
Fd=128KHz

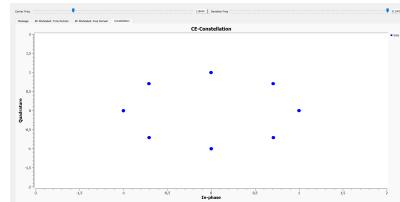


Figura 12: Constelacion FSK Fc=128KHz y
Fd=512KHz

La desviación de frecuencia tiene un impacto directo en la dispersión de los puntos en el diagrama de constelación. A mayor desviación, los puntos se separan más, mejorando la discriminación entre estados lógicos pero requiriendo un mayor ancho de banda. Una desviación nula elimina la modulación, mientras que desviaciones intermedias como 128 kHz logran un balance adecuado entre separación y eficiencia espectral.

Preguntas de Control

La generación de una señal modulada en paso-bandas (RF) requiere un valor suficientemente alto de SPS (*Samples Per Symbol*) para garantizar una representación precisa. Un valor apropiado se puede determinar verificando que la señal no presente aliasing ni artefactos en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Si la señal muestra irregularidades, se debe incrementar el SPS hasta lograr transiciones suaves y un espectro limpio.

En el caso de la modulación BPSK, configurar el bloque *Multiply Const* con el valor 1 es equivalente a eliminarlo, ya que multiplicar por 1 no altera la amplitud de la señal. Por otro lado, en la modulación FSK, la constante en este bloque se deduce mediante la fórmula:

$$\text{Constante} = \frac{2\pi \cdot fd}{(Rs \cdot Sp)} \quad (1)$$

que asegura que los desplazamientos de frecuencia en la portadora correspondan correctamente a la desviación especificada.

En la modulación OOK, el bloque *Constant Source* se configura como cero para apagar la portadora cuando el bit modulante es "0", ya que esta técnica controla directamente la amplitud de la señal. En BPSK y FSK, en cambio, la señal modulante afecta el desfase o la frecuencia de la portadora, lo que no requiere apagarla, por lo que el valor de *Constant Source* no se configura como cero. Además, en OOK, la señal modulante entra por la primera entrada (superior) del VCO porque controla la amplitud de la señal, mientras que en BPSK



y FSK, donde se modifica el desfase o la frecuencia, la entrada utilizada es la segunda (inferior).

Respecto a la ubicación del bloque *Interpolating FIR Filter*, en la modulación BPSK sería técnicamente posible moverlo inmediatamente antes del VCO, ya que no afectaría la funcionalidad del desfase binario de la modulación. Sin embargo, esta reubicación no sería recomendable, ya que dificultaría la visualización adecuada del desfase aplicado en la señal, lo que podría comprometer la interpretación precisa de la modulación. Por otro lado, en la modulación FSK, no es adecuado reubicar este filtro después del bloque *e_ACUM*, ya que este bloque es responsable de generar el desfase progresivo necesario para la modulación. Si el filtro se aplicara después, podría distorsionar este desfase acumulado, afectando la precisión de la modulación de frecuencia y comprometiendo la calidad de la señal modulada.

Para crear un VCO RF con entrada de amplitud y frecuencia en GNU Radio, se puede emplear un bloque VCO que reciba la señal de frecuencia como entrada principal y una señal de amplitud combinada mediante un bloque Multiply. La señal de frecuencia controla el desfase de la portadora, mientras que la señal de amplitud ajusta su magnitud. Este flujo puede visualizarse en el dominio del tiempo y la frecuencia utilizando un bloque QT GUI Sink, asegurando una representación adecuada de la modulación.

Para garantizar que la señal modulada en RF no sufra aliasing, la frecuencia de la portadora (f_c) más la desviación de frecuencia (Δf) debe mantenerse por debajo del límite de Nyquist:

$$f_c + \Delta f < \frac{f_s}{2}.$$

En la representación EC, las frecuencias asociadas a los estados lógicos deben mantenerse dentro de la banda base para evitar solapamiento. La desviación de frecuencia máxima (Δf) debe cumplir:

$$\Delta f < \frac{f_s}{2}.$$

El valor de SPS (*Samples Per Symbol*) debe ser suficiente para representar correctamente la portadora sinusoidal en RF, siguiendo el teorema de Nyquist. La fórmula es:

$$SPS_{\min} = \frac{f_s}{f_c},$$

4. Conclusiones

- Cada técnica de modulación exhibió comportamientos particulares en el dominio del tiempo, la frecuencia y la constelación. La OOK se distingue por su simplicidad en la portadora, BPSK por sus

inversiones de fase y FSK por su variabilidad en frecuencia.

- En BPSK, los cambios de fase de 0° a 180° sincronizados con el mensaje generan una inversión de fase en RF. Esto se observa como un espectro centrado en la frecuencia de la portadora en RF y en 0 Hz en EC. La versión EC, al eliminar la portadora, permite un análisis claro en banda base y simplifica el procesamiento digital, algo esencial para aplicaciones de alta fidelidad en comunicaciones digitales.
- Al aumentar la frecuencia de la portadora en FSK, el espectro en RF muestra mayor separación de picos, mejorando la claridad de la señal, mientras que en EC la posición de los picos no cambia. Sin embargo, al incrementar la desviación de frecuencia, los picos en EC se separan, facilitando la distinción entre estados lógicos, aunque esto exige un mayor ancho de banda.
- El diagrama de constelación en EC para FSK refleja la independencia de la frecuencia de la portadora, ya que los puntos del diagrama dependen únicamente de la relación entre los niveles lógicos y la desviación de frecuencia. Con desviaciones mayores, los puntos en la constelación se distribuyen de manera más amplia, permitiendo una mejor separación visual entre los estados lógicos, aunque al costo de una mayor necesidad de ancho de banda.
- En OOK, la portadora es activada o desactivada según el bit transmitido, generando un espectro en RF centrado en la frecuencia de la portadora con armónicos asociados a las transiciones entre los estados “encendido” y “apagado.” En EC, sin la portadora, la señal se muestra en banda base, lo que facilita su interpretación y procesamiento sin ruido de alta frecuencia.

Referencias

- [1] hortegab. Comdigpractices2021sii/fase i/pract4 at main · hortegab/comdigpractices2021sii. [Online]. Available: <https://github.com/hortegab/ComdigPractices2021sii/tree/main/Fase%20I/Pract4>