

PRÁCTICA 3: De Radiofrecuencia a la Envolvente Compleja (GNURADIO)

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

5 de Octubre de 2025

Abstract This laboratory studied the behavior of different radio frequency signals and their representation using complex envelopes. Using GNU Radio, comparisons were made between signals with respect to their frequencies, and their behavior in phase and quadrature was analyzed. **Keywords:** *Frequency, complex envelopes, analyzed*.

1. Introducción

La modulación y demodulación de señales en sistemas de comunicaciones digitales se han beneficiado notablemente del uso de la representación en envolvente compleja (complex envelope, EC), que permite transformar señales de radiofrecuencia (RF) en equivalentes de banda base más manejables desde el punto de vista matemático y computacional. Esta técnica facilita la separación en componentes en fase (I) y cuadratura (Q), lo que simplifica el diseño de algoritmos de procesamiento digital de señales y reduce las tasas de muestreo necesarias en simulaciones y sistemas definidos por software (SDR).

En el contexto de SDR y herramientas como GNU Radio, la representación en banda base (o su equivalente complejo) es fundamental porque permite diseñar bloques funcionales (filtrados, moduladores, demoduladores) que operan directamente sobre las muestras digitales sin necesidad de manipular la señal RF en cada paso, lo cual mejora la eficiencia y flexibilidad del sistema. Otra ventaja de la envolvente compleja es que reduce el orden del sistema a modelar: en lugar de lidiar con altas frecuencias portadoras y sus efectos, se trabaja en un dominio centrado en cero (banda base), de modo que los modelos matemáticos y las ecuaciones resultantes son más simples y computacionalmente menos costosas.

Por lo tanto, en esta práctica se explorará cómo se implementan modulaciones digitales (como BPSK, FSK, OOK) utilizando la representación en envolvente compleja dentro de un entorno basado en GNU Radio.

Se analizará cómo se configuran los bloques del flujo de procesamiento, cómo se genera la señal modulada en banda base, y cómo esa señal puede transformarse para aplicarse en el dominio RF real, evaluando la fidelidad, eficiencia y precisión del sistema resultante [1].

2. Metodología

En este laboratorio se busca fortalecer el manejo de GNU Radio para la generación y análisis de señales en representaciones RF y EC, mediante flujogramas diseñados para modulaciones digitales OOK, BPSK y FSK. Se desarrollaron habilidades en la adaptación de bloques funcionales, observación de señales en diferentes dominios y comparación de comportamientos entre RF y EC [2].

Se evaluó el flujograma para analizar una señal OOK en versiones RF y EC, observando diferencias en el dominio del tiempo y la frecuencia al variar la frecuencia de la portadora. Además, se estudió el funcionamiento de los bloques `e_RF_VCO_ff` y `e_EC_VCO_fc` mediante el análisis de su código Python, documentando sus propósitos, parámetros y recomendaciones de uso. Posteriormente, el flujograma se modificó para implementar modulaciones BPSK en RF y EC, comparando su comportamiento con OOK y resaltando las diferencias en representación y rendimiento.

También se adaptó el flujograma para FSK, analizando la señal en el dominio del tiempo al variar la frecuencia de la portadora y la desviación, asegurando el correcto funcionamiento de los VCO. En el dominio de la frecuencia se identificaron valores de portadora y desviación que minimizan el solapamiento y permiten una representación clara del espectro FSK.

Asimismo, se documentó la señal FSK en la constelación para facilitar la comprensión visual de su estructura en banda base. Finalmente, se respondieron preguntas de control con el fin de reforzar los conceptos teóricos y prácticos adquiridos sobre modulaciones y comportamiento de señales en distintos dominios.

3. Resultados y Análisis de Resultados

En el desarrollo de esta práctica se realizaron los diferentes análisis a partir del diagrama de bloques mostrado en la Figura 9 de GNU Radio, del cual se obtuvieron diversos resultados.

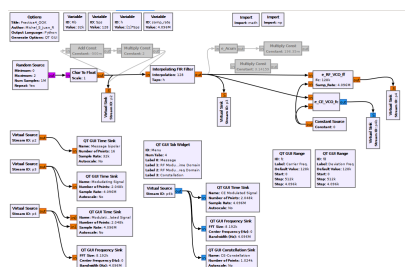


Figure 1: Diagrama de bloques de GNU Radio

3-A. Desarrollo

Para esta práctica se comprobó el funcionamiento del flujograma propuesto, analizando una señal OOK (On-Off Keying) tanto en versión RF como en versión de envolvente compleja (EC) en banda base, los resultados dados son los vistos en la figura 9. El procedimiento seguido fue el siguiente:

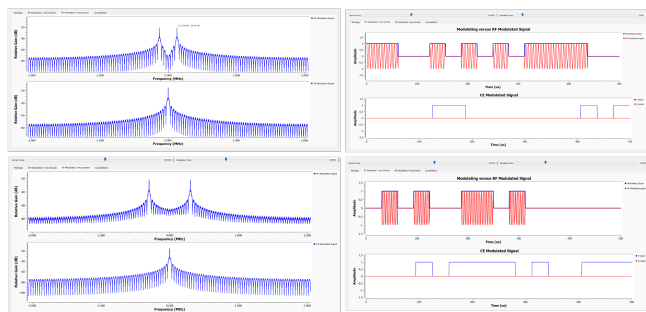


Figure 2: Modulación OOK en RF y EC con Fc=200KHz y Fc=300KHz respectivamente

En la pestaña “RF Modulated. Time Domain” se observó la señal modulada en versión RF y se comparó con la versión EC, identificando las componentes I (In-Phase) y Q (Quadrature). En la pestaña “RF Modulated. Freq Domain” se analizó el espectro de la señal modulada en versión RF y se comparó con el espectro de la señal modulada en versión EC. Posteriormente, se repitió el análisis del espectro variando la frecuencia de la portadora (Carrier Freq) para observar los cambios en la posición de las bandas de frecuencia. Se realizaron múltiples variaciones de la frecuencia de la portadora para corroborar la consistencia del comportamiento de

la señal modulada en ambas versiones. Además, se registraron evidencias gráficas de las señales y espectros obtenidos, incluyendo capturas de los bloques de GNU Radio, para su inclusión en el informe. Finalmente, se compararon los moduladores OOK en versión RF y EC, destacando que la versión RF muestra la señal completa en alta frecuencia, incluyendo la portadora, mientras que la versión EC permite observar directamente la información modulada en amplitud y fase sin la portadora. Asimismo, la versión EC facilita el análisis de la señal al permitir separar las componentes I y Q, simplificando los procesos de demodulación y filtrado.

3-B. Bloques VCO

Código Python: RF VCO para GNU Radio

```
import numpy as np
from gnuradio import gr
import math

class blk(gr.sync_block):
    """RF VCO: genera una señal RF modulada en amplitud y fase."""

    def __init__(self, fc=120000, samp_rate=320000):
        # Inicializa el bloque como un bloque sincronizado de GNU Radio
        # in_sig: dos entradas de tipo float32 (A y Q)
        # out_sig: una salida de tipo float32 (señal RF)
        gr.sync_block.__init__(
            self,
            name='e_RF_VCO_fc',
            in_sig=[np.float32, np.float32],
            out_sig=[np.float32]
        )
        self.fc = fc # Frecuencia de la portadora en Hz
        self.samp_rate = samp_rate # Frecuencia de muestreo en Hz
        self.n_m = 0 # Contador de muestras para generar el vector de tiempo

    def work(self, input_items, output_items):
        A = input_items[0] # Amplitud de la señal
        Q = input_items[1] # Fase de la señal
        y = output_items[0] # Salida del bloque
        N = len(A) # Número de muestras a procesar
        n = np.linspace(self.n_m, self.n_m + N - 1, N) # Vector de índices de muestra
        self.n_m += N # Actualiza el contador de muestras
        # Señal RF: y[n] = A[n] * cos(2*pi*fc*n/fs + Q[n])
        y[:] = A * np.cos(2 * math.pi * self.fc * n / self.samp_rate + Q)
        return len(output_items[0]) # Retorna el número de muestras procesadas
```

Figure 3: Código del Bloque e_RF_VCO_fc

Código Python: EC VCO para GNU Radio

```
import numpy as np
from gnuradio import gr
import math

class blk(gr.sync_block):
    """EC VCO: genera una señal compleja en banda base (I + jQ)."""

    def __init__(self):
        # Inicializa el bloque como un bloque sincronizado de GNU Radio
        # in_sig: dos entradas de tipo float32 (A y Q)
        # out_sig: una salida de tipo complex64 (señal compleja)
        gr.sync_block.__init__(
            self,
            name='e_EC_VCO_fc',
            in_sig=[np.float32, np.float32],
            out_sig=[np.complex64]
        )

    def work(self, input_items, output_items):
        A = input_items[0] # Amplitud de la señal
        Q = input_items[1] # Fase de la señal
        y = output_items[0] # Salida del bloque
        N = len(A) # Número de muestras a procesar
        # Señal compleja: y[n] = A[n] * exp(j * Q[n])
        y[:] = A * np.exp(1j * Q)
        return len(output_items[0]) # Retorna el número de muestras procesadas
```

Figure 4: Bloque e_EC_VCO_fc

4. Adaptación del Flujoograma a BPSK

Para esta parte de la práctica se modificó el flujoograma original para implementar un modulador BPSK tanto en versión RF como en versión EC.

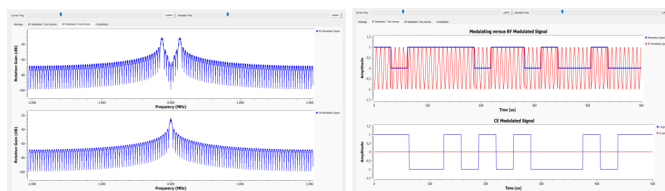


Figure 5: Modulación BPSK $F_c=128$ kHz

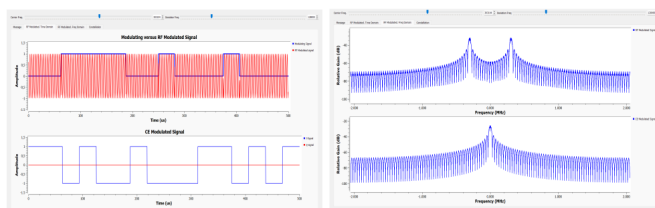


Figure 6: Modulación BPSK $F_c=303$ kHz

Se reconfiguraron los bloques del flujoograma, activando algunos previamente desactivados y realizando interconexiones para que el sistema se comportara como un modulador BPSK:

- La señal de entrada (bitstream) se aplicó a un bloque de conversión de bits a fase.
- La salida se conectó a los bloques `e_RF_VCO_ff` y `e_EC_VCO_fc`, generando la señal modulada en RF y en EC respectivamente.
- En la versión EC, se utilizó un `Constant Source` con valor 1 como amplitud de la señal modulada.
- Un modulador BPSK en versiones RF y EC se diferencia principalmente en la representación de la señal. En RF, la señal incluye la portadora sinusoidal, y los cambios de fase (0° a 180°) se reflejan como inversiones de la onda, visibles en el dominio del tiempo y centradas en la frecuencia de la portadora en el dominio de la frecuencia. En EC, la señal se representa en banda base mediante las componentes I y Q, centrada en 0 Hz, eliminando la portadora y simplificando el análisis y procesamiento digital. La versión RF se utiliza para transmisión física, mientras que la EC facilita simulaciones y evaluación de la modulación.

5. Adaptación del Flujoograma a FSK

Para esta práctica se adaptó el flujoograma para implementar un modulador FSK (Frequency Shift Keying) en versión RF y versión EC.

- Se reconfiguraron los bloques activando aquellos necesarios y realizando interconexiones para que el flujoograma funcionara como modulador FSK:
- La señal de entrada (bitstream) se acondicionó para producir variaciones de frecuencia en los VCO.
- Se conectaron los bloques `e_RF_VCO_ff` y `e_EC_VCO_fc` para generar la señal modulada en RF y en EC, respectivamente.

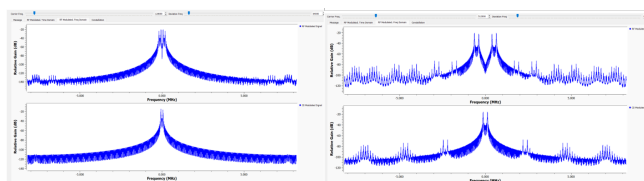


Figure 7: Modulación FSK de la frecuencia

Durante las pruebas se observó que la frecuencia de la portadora no afecta la estabilidad de la envolvente compleja (EC), pero sí determina la separación de los picos principales en RF. Con portadoras bajas, los picos se acercan 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 de los picos, pero un exceso provoca desplazamientos y disminución de ganancia, sin alterar la forma general de la señal. Como se observa en la figura 8, para una portadora de 128 kHz y desviación de 64 kHz, los picos se distinguen con claridad y el ruido espectral es bajo. Al aumentar la frecuencia de portadora a 512 kHz con desviación de 128 kHz, los picos se separan más, emergiendo estructuras similares a la densidad espectral de potencia (PSD).

Cuando la frecuencia de la portadora se mantiene constante y la desviación de frecuencia varía en una señal FSK, se observan efectos significativos en RF y EC, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En RF, un incremento de la desviación provoca mayores oscilaciones de la portadora durante la transmisión de cada bit, haciendo que las transiciones entre los estados lógicos "0" y "1" sean más pronunciadas en el tiempo. Este comportamiento evidencia cómo la moduladora en EC refleja directamente la estructura espectral y la transición de estados de la señal RF.

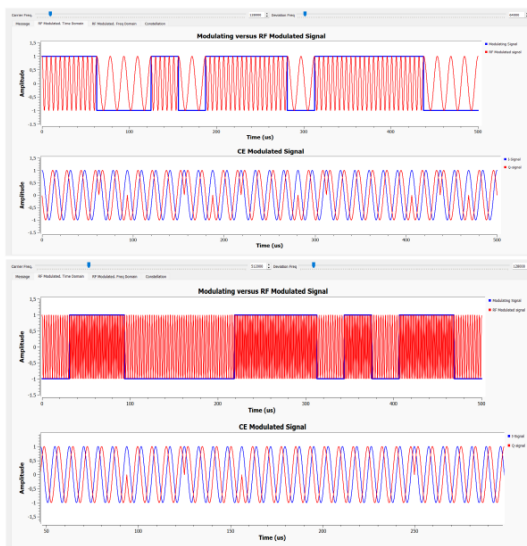


Figure 8: Modulación FSK en el dominio del tiempo

Diagrama de constelación para FSK

Se analizó el diagrama de constelación de una señal FSK bajo dos condiciones: variando la frecuencia de la portadora con desviación constante, y variando la desviación de frecuencia con portadora fija. Este estudio permitió observar cómo ambos parámetros afectan la posición y distribución de los puntos en la constelación, facilitando la comprensión visual del comportamiento de la señal modulada.

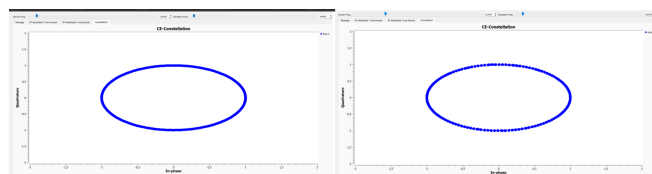


Figure 9: Modulación FSK en la constelación

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.

Preguntas de control

- Generar la versión paso-bandas (señal RF) de una modulación ha obligado a usar un valor muy alto para SPS. ¿Cómo se sabría que el valor elegido es apropiado o suficientemente alto?**
El valor elegido es “apropiado o suficientemente alto” si la señal RF se reconstruye sin aliasing (en

tiempo y frecuencia), mantiene la forma de onda esperada (de la envolvente y la fase), y cumple la relación de Nyquist respecto a la portadora y al ancho de banda de la modulación.

- ¿Qué pasaría si el bloque “Multiply Const” que se activa para la modulación BPSK se configura con el valor 1, ¿es lo mismo que quitarlo?**
Configurar el bloque “Multiply Const” con el valor 1 tendría el mismo efecto que quitarlo, ya que multiplicar por 1 no afecta la señal porque este bloque modifica la amplitud de la señal modulada.
- ¿Cómo se puede deducir la fórmula que hay dentro del bloque “Multiply Const” que se activa para la modulación FSK?**

En la modulación FSK, la frecuencia instantánea de la señal se modifica de acuerdo con los símbolos transmitidos. La fase acumulada en tiempo discreto puede expresarse como $\phi[n] = \phi[n-1] + k \cdot m[n]$, donde $m[n]$ representa la secuencia de símbolos y k es la constante que determina el incremento de fase por muestra. La constante está relacionada con la desviación de frecuencia f_d y la frecuencia de muestreo F_s mediante $k = \frac{2\pi f_d}{F_s}$; la frecuencia de muestreo se define a partir de la tasa de bits (R_b) y el número de muestras por símbolo (Sps) como $F_s = R_b \cdot Sps$. La constante de multiplicación usada en el bloque es: $k = 2\pi \frac{f_d}{R_b \cdot Sps}$.

- ¿Por qué el bloque “Constant Source” se configura como cero para la modulación OOK pero no para la BPSK y la FSK?**
En la modulación OOK, el bloque ... se configura como cero porque la amplitud de la señal OOK está determinada únicamente por la presencia o ausencia de la señal modulante mientras que en BPSK y FSK no lo es, ya que se requiere un nivel base para generar los cambios de fase o frecuencia.
- ¿Por qué razón en el caso de la Modulación OOK la señal modulante entra por la primera entrada (la superior) de los VCO a diferencia de la BPSK y FSK que entra por la segunda entrada (la inferior) de los VCO?**

En la modulación OOK, la señal modulante se conecta a la primera entrada del VCO porque controla directamente la amplitud de la portadora (encendido o apagado). En cambio, en BPSK y FSK la información modifica la fase o la frecuencia, por lo que la señal modulante se aplica a la segunda entrada del VCO, destinada al control de estos parámetros.

- Para el caso de la Modulación BPSK, sería posible reubicar el bloque “Interpolating FIR Filter**

para que quede inmediatamente antes de los VCO”

Sí, es posible reubicar el bloque `Interpolating FIR Filter` antes de los VCO, siempre que se mantenga la coherencia en las tasas de muestreo y los parámetros como F_s y Sps . Esta ubicación resulta conveniente, ya que el proceso de filtrado e interpolación suele realizarse justo antes de la modulación en RF, permitiendo reducir la carga computacional y conservar la forma de onda correctamente interpolada.

- g. **Para el caso de la Modulación FSK, sería posible reubicar el bloque “Interpolating FIR Filter para que quede inmediatamente antes de los VCO”**

Sí, es posible reubicar el bloque `Interpolating FIR Filter` inmediatamente antes de los VCO en la modulación FSK, siempre que se mantenga la coherencia en las tasas de muestreo. Esta ubicación puede ser incluso más apropiada, ya que permite que la señal interpolada ingrese directamente al oscilador controlado por voltaje, garantizando una variación de frecuencia más continua y precisa, además de reducir la carga de procesamiento en etapas previas.

- h. **Para los valores dados del caso FSK en el flujograma por defecto, ¿sería posible calcular el valor máximo permitido para la frecuencia de la portadora, pensado en términos de la versión en RF?**

El valor máximo permitido para la frecuencia de la portadora en la modulación FSK está limitado por la frecuencia de muestreo del sistema. En general, la frecuencia de la portadora debe ser menor que la mitad de la frecuencia de muestreo ($F_c < \frac{F_s}{2}$) para evitar aliasing en la versión en RF y garantizar una correcta representación de la señal modulada.

- i. **Para los valores dados del caso FSK en el flujograma por defecto, ¿sería posible calcular el valor máximo permitido para la desviación de frecuencia, pensado en términos de generar solo la EC?**

El valor máximo permitido para la desviación de frecuencia en la modulación FSK está limitado por la frecuencia de muestreo y la posición de la portadora. A partir del criterio de Nyquist, se obtiene que la desviación máxima debe cumplir $f_{d,max} = \frac{F_s}{2} - f_c - \frac{R_b}{2}$, garantizando que el ancho de banda total de la señal modulada se mantenga dentro del rango de muestreo y evitando aliasing en la versión en RF.

- j. **Para los valores dados del caso BPSK en el flujograma por defecto, ¿sería posible calcular**

el mínimo valor de SPS pensado en términos de poder generar la versión en RF?

En la modulación BPSK, el valor mínimo de Sps (muestras por símbolo) está limitado por el criterio de Nyquist y la correcta representación de la portadora. Debe garantizarse que la frecuencia de muestreo $F_s = R_b \cdot Sps$ sea al menos el doble de la frecuencia de la portadora, es decir $F_s \geq 2f_c$, para evitar aliasing y permitir generar adecuadamente la versión en RF.

6. Conclusiones

- El análisis de las modulaciones BPSK, FSK y OOK demuestra la importancia de comprender cómo cada técnica utiliza la amplitud, la fase o la frecuencia para transmitir información, garantizando una modulación coherente y eficiente en el dominio RF.
- La representación en envolvente compleja (EC) facilita los cálculos matemáticos y el diseño de algoritmos, ofreciendo una visión más clara de la información de la señal y simplificando su interpretación y procesamiento frente a la versión en radiofrecuencia (RF).
- La diferencia principal entre los moduladores BPSK y OOK en versiones RF y EC radica en que la versión RF conserva la portadora de alta frecuencia, mientras que la versión EC trabaja en banda base, separando las componentes I y Q para facilitar el análisis y procesamiento digital. En OOK, la portadora se activa o desactiva según el bit transmitido, generando en RF un espectro centrado en la portadora, mientras que en EC se elimina dicha portadora, permitiendo una interpretación más clara sin interferencias de alta frecuencia.
- En FSK, el diagrama de constelación en EC evidencia que la señal es independiente de la frecuencia de la portadora; los puntos dependen únicamente de los niveles lógicos y la desviación de frecuencia. A mayor desviación, los puntos se distribuyen más ampliamente, mejorando la separación visual entre estados lógicos, aunque incrementando el ancho de banda requerido.

Referencias

- [1] Complex envelope implementation. [Online]. Available: https://electroagenda.com/en/complex-envelope-implementation/?utm_source
- [2] hortegab. Comdigpractices2021sii/fase i/pract4 at main · hortegab/comdigpractices2021sii. [Online]. Available: <https://github.com/hortegab/ComdigPractices2021sii/tree/main/Fase%20I/Pract4>