

# Práctica 3: De Radiofrecuencia a la Envolvente Compleja (GNURADIO)

Anderson David Hernandez Rodriguez - 2202930  
Karen Daniela Rangel Uribe - 2191709  
Sharon Catalina Vargas Cortes - 2211259

[https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2<sub>B1</sub>G<sub>2</sub>](https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2_B1_G2)

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Universidad Industrial de Santander

27 de marzo 2025

## Abstract

This study analyzes radio frequency modulated signals and their conversion into complex envelopes using GNURadio. Digital modulation schemes such as OOK, BPSK, and FSK were evaluated in the time, frequency, and constellation domains. Flowcharts were designed and adjusted to implement these modulations in both RF and EC, considering parameters like carrier frequency and frequency offset. The roles of the e-RF-VCO-ff and e-EC-VCO-fc blocks in the modulation process were also examined.

## 1. Introducción

En este laboratorio se estudia la conversión de señales RF a envolvente compleja usando GNURadio, facilitando el análisis en comunicaciones digitales. Se implementan diagramas de flujo para explorar modulaciones digitales como OOK, BPSK y FSK, analizando su comportamiento en distintos dominios y comprendiendo el efecto de diversos parámetros y bloques clave del software.[1]

## 2. Metodología

Se generaron señales moduladas en RF y se aplicaron técnicas para convertirlas a su representación en envolvente compleja (EC). Este proceso permitió observar cómo varía la señal al modificar parámetros como la frecuencia portadora y la desviación en frecuencia. Las señales obtenidas fueron estudiadas en los dominios del tiempo, la frecuencia y la constelación para evaluar los efectos de la conversión RF-EC. Se comparó el comportamiento de las modulaciones antes y después de la

conversión, permitiendo identificar variaciones y patrones característicos en cada una.

Además, se analizaron parámetros clave como la frecuencia portadora y la desviación de frecuencia en el caso de la modulación FSK. Se realizaron modificaciones en estos valores con el objetivo de comprender su impacto en la señal modulada y en su representación en envolvente compleja.

También, se llevó a cabo un estudio detallado de los bloques encargados de la conversión RF-EC, examinando su configuración y su influencia en el proceso de modulación. Con base en los resultados obtenidos, se extrajeron conclusiones sobre la importancia de la conversión RF-EC y su aplicación en sistemas de comunicación digitales.

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

## 3. Resultados

### 3.1. Modulación OOK: RF vs EC

Después de comprobar el funcionamiento del flujo grama analizando una señal OOK (On-Off Keying) en versiones RF y EC comparando ambas señales en el dominio del tiempo mediante la pestaña RF Modulated. Time Domain observando la señal modulada en RF junto con las componentes I y Q de la versión EC y en la pestaña RF Modulated. Freq Domain", comparando sus espectros en el dominio de la frecuencia y variando la fre-

cuencia de la portadora (Carrier Freq) en dos ocasiones para evaluar su impacto en la modulación se obtuvieron los siguientes resultados.

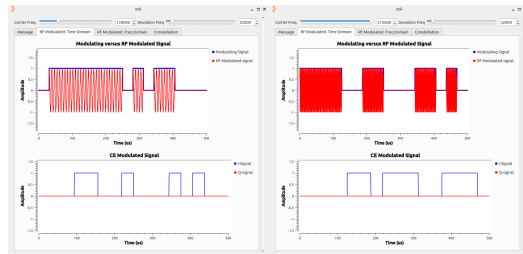


Figura 5. Señal OOK ( RF - EC)

En la Fig. 5 se comparan señales con frecuencias portadoras de 128 kHz y 512 kHz. La señal en envolvente compleja (EC) se mantiene sin cambios al variar la frecuencia portadora, ya que está en banda base. En cambio, la señal en RF sí refleja los cambios en frecuencia, evidenciando la influencia directa de la portadora.

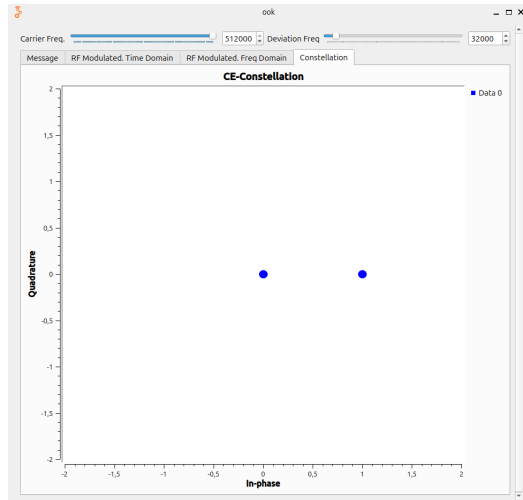


Figura 6. Diagrama de constelación de la señal con una frecuencia portadora de 512KHz )

En la Fig. 6 se presenta la constelación de una señal OOK modulada a 512 kHz. Los puntos se ubican solo sobre el eje in-phase, sin componente imaginaria, debido a un ajuste en el bloque e-CE-VCO-fc que evita la introducción de componente cuadratura. Esto da como resultado una señal real con dos niveles de amplitud, propios de la modulación OOK.

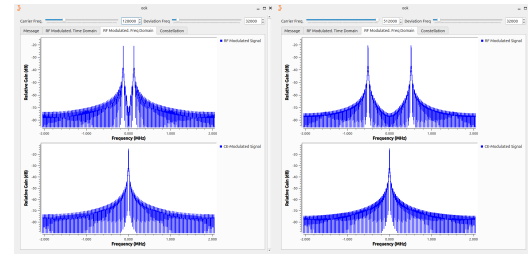


Figura 7. Diagrama de constelación de la señal con una frecuencia portadora de 512KHz )

La Fig 7, muestra cómo el aumento de la frecuencia portadora desplaza el espectro de la señal RF hacia frecuencias más altas, generando picos simétricos. En contraste, la envolvente compleja se mantiene centrada en cero, ya que es una señal en banda base. El contenido espectral no cambia, solo su ubicación en frecuencia.

### 3.2. e\_RF\_VCO\_ff y el e\_EC\_VCO\_fc

Posteriormente, se realizó un análisis detallado de los bloques e\_RF\_VCO\_ff y e\_EC\_VCO\_fc. A partir de este estudio, se elaboró un texto de ayuda pensado para orientar a cualquier usuario que tenga dudas sobre el funcionamiento de dichos bloques. El texto desarrollado para el bloque e\_RF\_VCO\_ff es el siguiente:

This block is a RF VCO and works as following:  
It takes two input signals:  
- A: Amplitude signal (carrier amplitude)  
- Q: Phase signal (instantaneous phase)

The block generates an output signal which is a cosine wave modulated in phase according to the input signals. The frequency of the generated wave is determined by the carrier frequency (fc) and the sampling rate (samp\_rate).

The formula used for the output signal is:  
 $y[n] = A[n] \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot n / \text{samp\_rate} + Q[n])$

Where:  
- n is the sample index,  
- fc is the carrier frequency,  
- samp\_rate is the sampling rate,  
- A[n] and Q[n] are the input signals.

This block acts as a Voltage-Controlled Oscillator (VCO) in RF applications, generating a frequency-modulated waveform based on the input parameters.

Usage recommendations:  
- Ensure that the sampling rate (samp\_rate) is at least twice the carrier frequency (fc) to avoid aliasing.  
- Check the values of fc and samp\_rate to ensure the generated signal falls within the expected bandwidth of the communication system.

Figura 8. Help Message for Block e\_RF\_VCO\_ff

El texto creado para el bloque e\_EC\_VCO\_fc se puede observar a continuación:

## Help Message for Block e\_CE\_VCO\_fc

This block is a CE VCO or baseband VCO and works as following:

It receives two input signals:

- A: Amplitude signal (modulation amplitude)
- Q: Phase signal (instantaneous phase)

The block generates an output signal that is a complex exponential wave, where the amplitude is determined by A and the phase by Q. This is commonly used in baseband processing, where signals are represented in the complex domain.

The formula used for the output signal is:

$$y[n] = A[n] * \exp(1j * Q[n])$$

Where:

- n is the sample index,
- A[n] is the input amplitude signal,
- Q[n] is the phase input signal,
- 1j represents the imaginary unit.

This block acts as a baseband Voltage-Controlled Oscillator (VCO), generating a complex modulated waveform based on the input parameters.

Usage recommendations:

- Ensure the phase signal (Q) is continuous and smooth to avoid sudden phase jumps that could cause undesired spectral components.
- Use a proper sampling rate to avoid aliasing and maintain signal fidelity.

Figura 9. Help Message for Block e\_CE\_VCO\_fc

### 3.3. Modulación BPSK: RF vs EC

Una vez adaptado el flujograma original para implementar un modulador BPSK en RF y EC, reutilizar los bloques desactivados realizando las interconexiones necesarias, ajustando la amplitud y la fase según el tipo de modulación se obtuvieron pruebas comparativas entre ambas versiones.

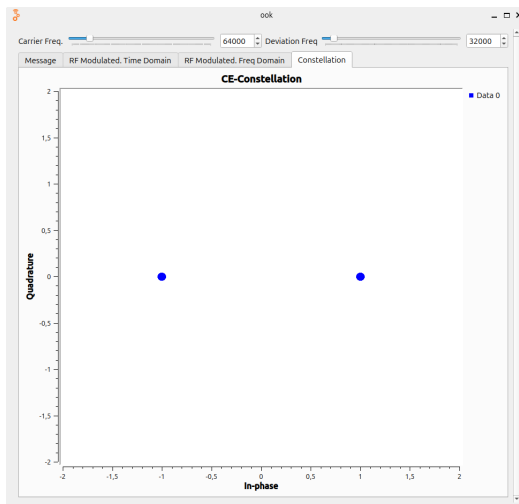


Figura 10. Diagrama de constelación señal BPSK ( RF - EC)

En la Fig 10, se muestra un diagrama de constelación correspondiente a una modulación BPSK. La señal modulada tiene dos posibles fases (bits 0 y 1) y la ausencia de componentes en el eje de cuadratura. La separación entre los puntos muestran una transmisión limpia, sin presencia de ruido o interferencia significativa.

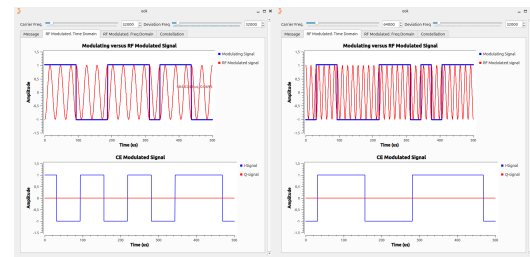


Figura 11. Señal modulada en RF - señal modulada CE

En la Fig 11, se observa que la señal modulada presenta únicamente variaciones en la componente en fase (I), mientras que la componente en cuadratura (Q) permanece constante en cero. En la gráfica superior la frecuencia de la señal RF modulada cambia según la información binaria de la señal moduladora, confirmando una modulación precisa y efectiva.

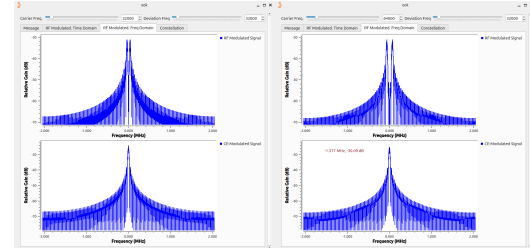


Figura 12. Señal modulada en RF - señal modulada CE en frecuencia

En la Fig 12, se presentan los espectros en frecuencia de la señal modulada en RF y su correspondiente señal CE. Al aumentar la frecuencia portadora de 32kHz (izquierda) a 64kHz (derecha), el espectro se desplaza hacia frecuencias más altas, manteniendo una distribución simétrica alrededor de la portadora. La forma del espectro muestra el ensanchamiento asociado a la modulación en frecuencia, donde el ancho de banda está relacionado con la frecuencia de desviación.

### 3.4. FSK tanto en versión RF como en versión EC

En el dominio del tiempo, al utilizar una desviación de frecuencia de 64kHz, se observa que la señal modulada en RF presenta una menor densidad de ciclos por cada bit, con transiciones más suaves entre los niveles. En la versión EC, las componentes I y Q mantienen una oscilación más regular y menos rápida, indicando una menor separación entre las frecuencias portadoras utilizadas para representar los bits '0' y '1'.

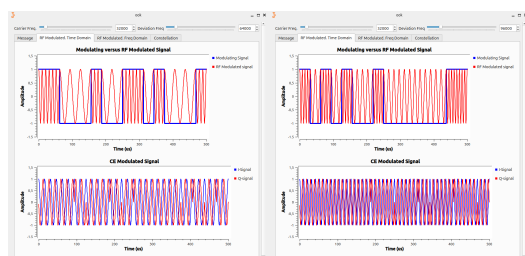


Figura 13. Señal FSK en dominio del tiempo con desviación de frecuencia de 64kHz (versión RF y EC)

En la Fig 14 se observa la señal FSK en el dominio del tiempo con una frecuencia portadora de 64kHz. Se aprecia cómo la señal modulada varía en función de la señal digital, manteniendo la misma amplitud pero cambiando la frecuencia de la portadora. A medida que aumenta la frecuencia portadora, se incrementa la densidad de ciclos por unidad de tiempo en la señal RF y también en la representación en cuadratura (I/Q).

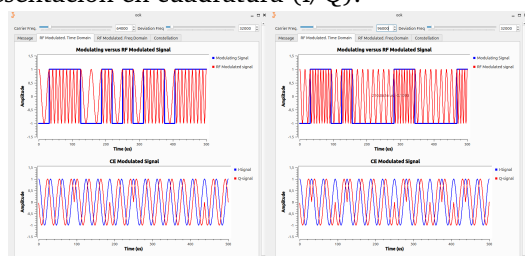


Figura 14. Variación de la frecuencia de desviación en modulación FSK (Dominio del tiempo)

### 3.5. FSK en la constelación

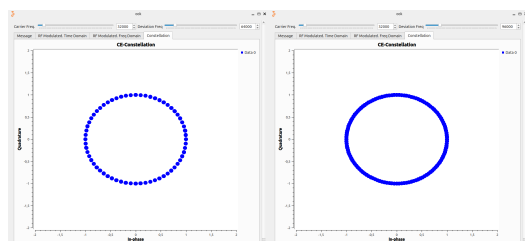


Figura 15. Diagrama de constelación señal FSK

En la Fig 15 se muestra la constelación de una señal modulada por FSK. A diferencia de modulaciones como BPSK o QPSK que presentan puntos discretos, en FSK la constelación forma un anillo continuo de puntos. Esto se debe a que la información se transmite mediante variaciones en la frecuencia y no en la fase o amplitud, lo que genera múltiples valores de fase momentánea durante la transmisión. En este caso, al aumentar la frecuencia de desviación (de 64kHz a 96kHz), se observa una ma-

yor densidad de puntos sobre la circunferencia, lo cual indica una mayor separación entre las frecuencias usadas para representar los símbolos, y por tanto, una señal más robusta a interferencias, pero con mayor ancho de banda.

#### 3.5.1. Preguntas de auto control sobre el flujograma RF-EC-xxx.grc:

Para determinar si el valor de SPS (Samples Per Symbol) elegido es apropiado o suficientemente alto en la versión paso-banda de una señal RF, se pueden considerar los siguientes criterios:

La tasa de muestreo ( $f_s$ ) debe ser al menos el doble de la frecuencia de la portadora para evitar aliasing. Si la portadora está en  $f_c$  Hz, entonces:

$$f_s \geq 2f_c \quad (1)$$

Esto impone un límite mínimo sobre el SPS en función de la tasa de símbolos y la frecuencia de la portadora. Se debe observar que la señal modulada se reconstruya suavemente sin efectos de aliasing o cuantización. La señal debe mantenerse bien definida en su banda de frecuencia esperada. El bloque "Multiply Const" en GNU Radio se usa para escalar la señal multiplicándola por un valor constante. Si se configura con 1, el valor de la señal no cambia, pero el bloque sigue existiendo en el flujo de procesamiento.

En la modulación FSK (Frequency Shift Keying), la información se transmite variando la frecuencia de la señal portadora en función de los símbolos transmitidos. Para implementar FSK en GNU Radio, el bloque Multiply Const se usa para ajustar la frecuencia de la señal modulada.

$$s(t) = A \cos(2\pi f_i t + \Phi) \quad (2)$$

El bloque "Constant Source" se configura como cero en la modulación OOK porque esta técnica representa el bit 0 mediante la ausencia de señal (apagado), por lo que un valor cero indica que no se transmite nada. En cambio, en BPSK y FSK siempre hay señal presente: BPSK codifica los bits mediante un cambio de fase (por ejemplo,  $+1$  y  $-1$ ), y FSK mediante un cambio de frecuencia, por lo que no se usa el valor cero para representar ausencia de señal, sino que se usan distintos niveles para controlar las variaciones en fase o frecuencia.

En OOK, la señal modulante actúa como un interruptor que enciende o apaga la portadora desde la entrada superior del VCO. En BPSK y FSK, la modulante controla

fase o frecuencia, por lo que se conecta a la entrada inferior del VCO, que modifica directamente el comportamiento del oscilador.

El filtro Interpolating FIR se aplica antes de la modulación para filtrar y ajustar la tasa de muestreo de los datos digitales. Colocarlos después del VCO podría distorsionar la señal ya modulada, afectando negativamente la integridad de la modulación en BPSK.

En modulación FSK, tampoco es adecuado ubicar el filtro FIR justo antes de los VCO, ya que su función es actuar sobre la señal digital en banda base. Su objetivo es suavizar la señal y ajustar la tasa de muestreo, mejorando la calidad de la modulación al reducir interferencias y transiciones bruscas entre bits.

### 3.5.2. Otras preguntas de control:

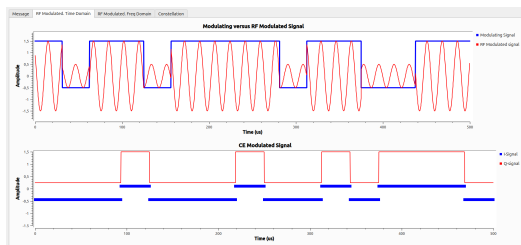


Figura 16. Modulación QAM en el dominio del tiempo

En la Fig 16 se observa la comparación entre la señal moduladora y la señal RF modulada, donde se aprecian las variaciones tanto en amplitud como en frecuencia. Esta implementación demuestra la capacidad del VCO para generar una señal modulada en función de parámetros dinámicos de entrada.

Es posible calcular el valor máximo permitido para la frecuencia de la portadora en una versión RF de FSK, pero para hacerlo se deben considerar varios factores clave del sistema, especialmente en el contexto del flujo por defecto en GNU Radio. Entonces, el valor máximo permitido para la frecuencia de la portadora en una implementación en RF (pensando en simulación digital) sería:

$$F_{maxportadora} = \frac{F_S}{2} - \Delta f \quad (3)$$

Para generar únicamente la envolvente compleja (EC) en una modulación FSK sin causar aliasing, la desviación de frecuencia máxima  $\Delta f$  debe cumplir con el Teorema de Nyquist, es decir, la frecuencia total de la señal modula-

da no debe superar la mitad de la frecuencia de muestreo  $\frac{F_S}{2}$ . Por lo tanto, el valor máximo permitido para  $\Delta f$  se calcula como:

$$\Delta f_{max} = \frac{F_S}{2} - F_{portadora} \quad (4)$$

Para generar una versión en RF de una señal BPSK sin aliasing, el valor mínimo de muestras por símbolo (SPS) debe garantizar que la frecuencia de muestreo sea al menos el doble de la frecuencia de la portadora, según el Teorema de Nyquist. Como la frecuencia de muestreo se calcula como el producto entre la tasa de bits (R) y el SPS, se puede deducir que el valor mínimo de SPS es:

$$SPS_{min} = \frac{2 * F_{portadora}}{R_b} \quad (5)$$

## 4. Conclusiones

- Es fundamental mantener un equilibrio adecuado entre la frecuencia de la portadora y la desviación de frecuencia para asegurar que las modulaciones sean bien definidas, reconocibles y libres de interferencias. Esto no solo mejora la calidad de la señal, sino que también previene el solapamiento entre componentes espectrales, lo cual es esencial para una transmisión eficiente y sin errores.
- Es indispensable aplicar un buen filtrado del ruido, ya que se comprobó que su presencia afecta significativamente la forma y claridad de las constelaciones en las distintas modulaciones, comprometiendo así la precisión en la transmisión y recepción de los datos.
- A través de pequeñas modificaciones en el sistema de bloques inicial, es posible simular cualquiera de las modulaciones estudiadas en la parte teórica del curso, lo que demuestra la flexibilidad y aplicabilidad práctica del entorno de simulación.

## Referencias

- [1] H. O. Boada and O. M. R. Torres, *Comunicaciones Digitales basadas en radio definida por software*, primera ed. Bucaramanga, Colombia: Editorial UIS, 2019. [Online]. Available: <https://sites.google.com/saber.uis.edu.co/comdig>