

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

Duvan Nicolas Gomez Diaz - 2202786
Erwin Mauricio Blanco Otero - 2184673
Camilo Andrés Barreto Jimenez - 2184260

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

21 de Marzo del 2025

Abstract

This lab covered the fundamentals of modulation and demodulation of radio frequency (RF) signals, as well as their representation using the complex envelope (CE). Digital modulations such as OOK, BPSK, and FSK were analyzed, examining their properties in both baseband and passband, as well as their behavior in the time domain, frequency domain, and constellation diagram. During the experiments, the effects of changing the carrier frequency and frequency deviation were evaluated, highlighting the differences between RF and CE representations. This analysis provided insight into how various signal parameters affect performance and visual representation.

1. Introducción

El objetivo principal de este estudio es examinar tres esquemas de modulación digital —OOK, BPSK y FSK— mediante el uso de la envolvente compleja (EC). Esta herramienta resulta particularmente eficaz en el análisis de señales en sistemas lineales, ya que permite representar la información en términos de amplitud y fase. Debido a su naturaleza compleja, la implementación de señales EC involucra componentes digitales, incluso cuando las interfaces de entrada y salida del sistema son analógicas [1]. El análisis realizado se centra en la variación de las señales moduladas bajo distintas condiciones de transmisión, evaluando cómo se manifiestan los principios físicos fundamentales en cada tipo de modulación. Además, se estudian los procesos de modulación y demodulación que intervienen en los sistemas de comunicación, utilizando técnicas de procesamiento digital de señales que

facilitan una evaluación detallada del desempeño de cada esquema. Esta práctica tiene como finalidad caracterizar el comportamiento de las señales moduladas en un entorno simulado, permitiendo observar su rendimiento frente a diferentes escenarios y parámetros de prueba.

2. Metodología

2.1. Diagrama y análisis de bloques

A través del diagrama mostrado en la Figura 1, se representa un sistema diseñado en el software GNU Radio para convertir señales de radiofrecuencia a su correspondiente representación en envolvente compleja.

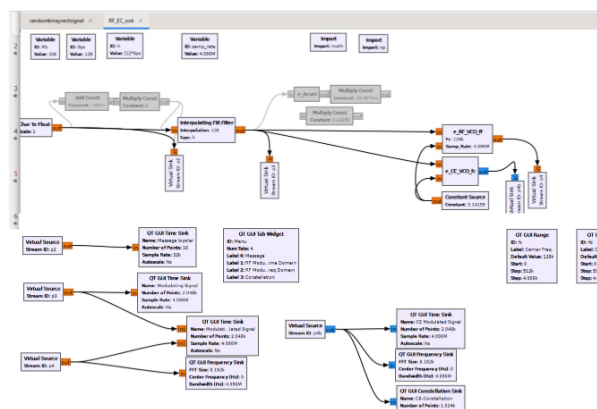


Figura 1. Diagrama de bloques para conversión RF a EC.

- El bloque RF_VCO_ff se encarga de calcular la señal en radiofrecuencia (RF) utilizando la ecuación:

$$y = A \cdot \cos \left(2\pi f_c \frac{n}{\text{samp_rate}} + Q \right)$$

donde A y Q son entradas que representan la amplitud y la fase, respectivamente. La frecuencia f_c corresponde a la portadora previamente definida, y n es un arreglo de índices. Como resultado, la salida del bloque es una señal cosenoidal que refleja las características especificadas.

- El bloque EC_VCO_f tiene como propósito generar la envolvente compleja (EC) de una señal, utilizando la siguiente función:

$$y = A \cdot \exp(j + Q)$$

donde A y Q son las entradas del bloque, representando la magnitud y la fase, respectivamente. La salida es una señal compleja cuya magnitud es A y cuya fase está determinada por Q .

- RF modulated, Dominio del tiempo**

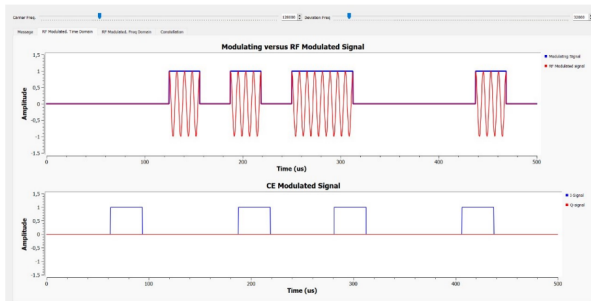


Figura 2. Señal modulada en EC y RF, $f_c = 128\text{kHz}$.

- RF modulated, Dominio de la frecuencia**

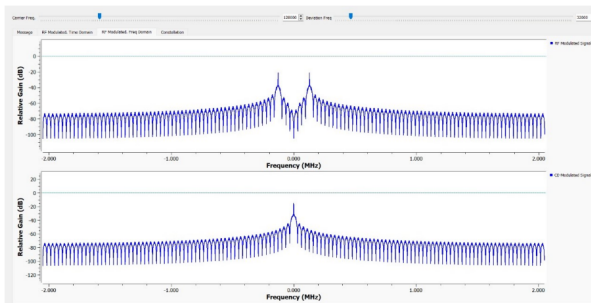


Figura 3. Señal con $f_c = 128\text{kHz}$.

- La Figura 4 muestra una señal de radiofrecuencia con una portadora de 500 kHz, representada en el dominio temporal.

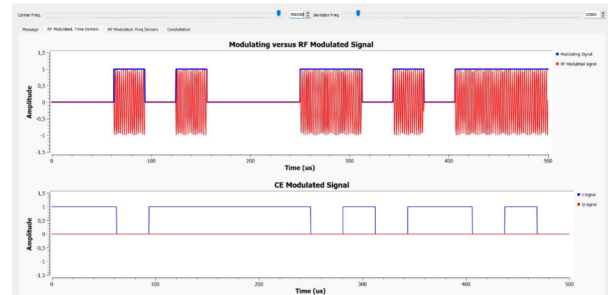


Figura 4. Señal modulada en RF y EC con $f_c = 500\text{kHz}$.

- La Figura 5 muestra una señal de radiofrecuencia con una portadora de 500 kHz, visualizada en el dominio de la frecuencia.

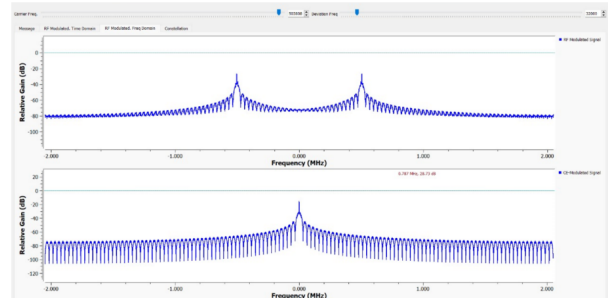


Figura 5. Señal con $f_c = 500\text{kHz}$.

2.2. BPSK

El flujograma fue reconfigurado conforme a las indicaciones de la guía, activando los bloques previamente deshabilitados y realizando las interconexiones necesarias para operar como un modulador BPSK, tanto en su versión en RF como en envolvente compleja (EC). En caso de que esta configuración no funcione, se utilizará la conexión alternativa situada a la derecha del bloque Interpolating FIR Filter, y se ajustará el valor del bloque Constant Source para que represente la amplitud de la señal modulada, en lugar de su fase. A continuación, se llevarán a cabo pruebas equivalentes a las del punto 1, ahora enfocadas en la modulación BPSK.

Se llevaron a cabo pruebas utilizando diferentes frecuencias, tanto bajas como altas. En este caso particular, las Figuras 6 (en el dominio del tiempo) y 7 (en el dominio de la frecuencia) muestran los resultados obtenidos al emplear una frecuencia portadora de $f_c = 128\text{kHz}$.

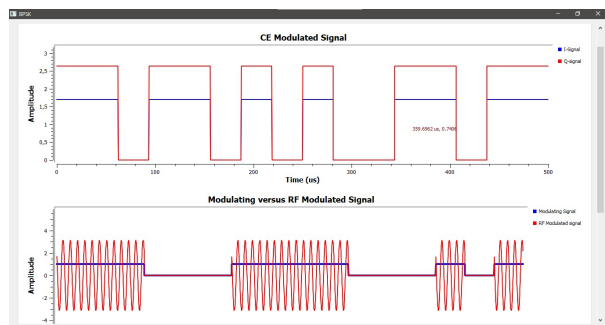


Figura 6. Señal modulada en EC y RF, $f_c = 128\text{kHz}$.

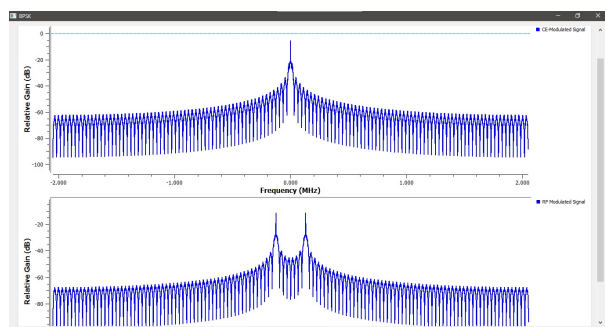


Figura 7. Señal con $f_c = 128\text{kHz}$.

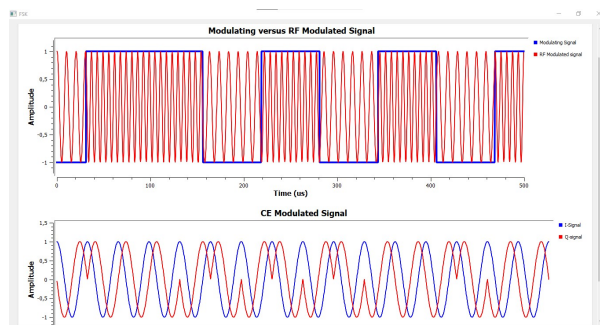


Figura 8. Señal modulada en RF y EC, $f_c = 130\text{kHz}$.

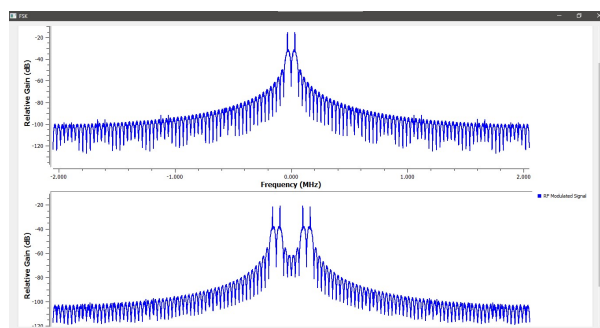


Figura 9. Señal con $f_c = 130\text{kHz}$.

2.3. FSK

En una primera etapa, se modificó el flujograma siguiendo las indicaciones de la guía. Posteriormente, se llevaron a cabo diversas pruebas en las que se variaron tanto la frecuencia de la portadora (f_c) como la desviación de frecuencia, observando el comportamiento de la señal modulada en el dominio del tiempo (pestaña *Modulated-Time*) y en el dominio de la frecuencia (pestaña *Modulated-Freq*). Se registraron evidencias gráficas, así como el procedimiento necesario para acondicionar la señal de entrada y permitir que los VCO generen modulación FSK en sus versiones RF y EC. Finalmente, se propuso un valor para la frecuencia portadora y la desviación que reduzca al mínimo el solapamiento espectral. Como ejemplo, una de las pruebas realizadas se presenta en las Figuras 8 y 9, correspondientes a una frecuencia portadora de $f_c = 130\text{ kHz}$.

3. Análisis de resultados

- Se llevó a cabo un análisis del flujograma propuesto, centrado en el comportamiento de la señal modulada tanto en RF como en su representación en envolvente compleja (EC). A través de diversas pruebas, se ajustaron varios parámetros del diagrama de bloques, incluyendo la frecuencia de la portadora y la desviación de frecuencia. Estos ajustes permitieron identificar los efectos de dichas variaciones en los dominios temporal y frecuencial, tanto para la señal en RF como para su equivalente en EC.
- Las señales obtenidas en los dominios del tiempo y de la frecuencia permiten identificar las características propias de la modulación OOK en sus versiones RF y de envolvente compleja (EC). En la implementación RF, la portadora se activa o desactiva según el valor del mensaje digital: un "1" activa la portadora, mientras que un "0" la suprime. En contraste, en la versión EC, la modulación se realiza directamente en banda base, generando una señal compleja con componentes en cuadratura (I y Q), que refleja directamente las transiciones del mensaje sin recurrir a una portadora de alta frecuencia.

Además, al comparar las Figuras 3 y 5 con las Figuras 2 y 3, se puede observar cómo el aumento de la frecuencia portadora a 500 kHz influye en las señales moduladas. En la versión RF, este incremento se manifiesta como una variación en la señal sinusoidal del dominio temporal. Por su parte, aunque en la versión EC no se utiliza una portadora explícita en banda base, la envolvente compleja sigue viéndose afectada por las condiciones de modulación, especialmente en la relación entre magnitud y fase. Estos resultados ponen en evidencia cómo tanto la frecuencia portadora como el dominio de operación inciden directamente en la forma de representación de la señal.

- Este bloque implementa un Oscilador Controlado por Voltaje (VCO) en radiofrecuencia, encargado de generar una señal sinusoidal cuya fase es modulada en función de las entradas. La frecuencia y la fase de la señal de salida se determinan a partir de las señales de entrada de amplitud (A) y fase (Q), ambas en formato `float32`. El valor predeterminado para la frecuencia portadora (f_c) es de 128,000 Hz, y la tasa de muestreo por defecto es de 320,000 Hz. La salida, también en formato `float32`, varía de acuerdo con las entradas, lo que la hace adecuada para tareas como pruebas de transmisión de señales moduladas o la generación de referencias en sistemas de comunicación. Para garantizar un funcionamiento óptimo, se recomienda que la tasa de muestreo sea al menos el doble de la frecuencia portadora, con el fin de evitar *aliasing*. Asimismo, es importante que los valores de fase (Q) se mantengan dentro del intervalo $-\pi$ a π para asegurar una modulación precisa.
- Este bloque corresponde a un Oscilador Controlado por Voltaje de banda base (Baseband VCO o CE VCO), diseñado para generar una señal compleja en formato I/Q que permite la implementación de modulación en fase. La salida es de tipo `complex64`, cuya magnitud se encuentra modulada por la entrada de amplitud (A), y su fase es ajustada a partir de la entrada de fase (Q), ambas en formato `float32`. Este componente es especialmente útil en sistemas de comunicación de banda base que requieren señales moduladas en cuadratura, como es el caso de esquemas de modulación en fase o amplitud, tales como QPSK y QAM. La amplitud de la señal de salida varía proporcionalmente con la entrada A, mientras que la entrada Q define la fase en radianes y debe mantenerse en el rango de $-\pi$ a π para garantizar una representación precisa.
- Gracias a su compatibilidad con otros bloques de procesamiento de señales complejas, este módulo resulta ideal para aplicaciones de transmisión de datos tanto en RF como en banda base. Se recomienda configurar adecuadamente los valores de entrada para asegurar un rendimiento óptimo.
- Un modulador BPSK en radiofrecuencia (RF) realiza la modulación directamente sobre la fase de una portadora de alta frecuencia, alternando típicamente entre 0° y 180° en función del valor del bit de entrada. Este enfoque es esencial en aplicaciones de comunicación inalámbrica, ya que permite la propagación efectiva de la señal a través del espectro electromagnético, siendo adecuado para escenarios que demandan gran alcance físico y resistencia frente a interferencias. No obstante, el tratamiento de señales en RF requiere componentes de hardware con capacidad para operar a altas frecuencias, lo que incrementa la complejidad y el costo del sistema. En contraste, un modulador BPSK basado en Envolvente Compleja (EC) realiza la modulación en banda base, eliminando la necesidad de una portadora de alta frecuencia explícita. En este caso, la señal modulada se representa en el dominio complejo mediante sus componentes en cuadratura (I y Q), permitiendo expresar directamente las variaciones de fase dentro de la señal compleja. Este enfoque facilita el procesamiento digital de señales, optimiza el uso de recursos computacionales y disminuye la dependencia de hardware especializado. Además, el uso de la envolvente compleja contribuye significativamente a la eficiencia en el diseño e implementación de transmisores y receptores digitales en sistemas de comunicación modernos.
- Durante el análisis de la modulación FSK, se llevaron a cabo diversas pruebas considerando dos escenarios: en el primero, se modificó la frecuencia portadora mientras se mantuvo constante la desviación de frecuencia; en el segundo, se mantuvo fija la frecuencia portadora y se variaron los valores de desviación. El comportamiento de la señal fue examinado principalmente en el dominio de la frecuencia. En el primer caso, se observó que la separación entre las frecuencias correspondientes a los bits "0" y "1" permanecía constante, independientemente del valor absoluto de la portadora. En cambio, en el segundo caso, dicha separación variaba directamente en función del valor asignado a la desviación de frecuencia, lo que afecta la distancia espectral entre los símbolos. Posteriormente, se

aplicó el mismo enfoque para evaluar el comportamiento de la señal en el diagrama de constelación correspondiente a la modulación FSK. Como resultado del análisis, se propuso una frecuencia portadora de $f_c = 50 \text{ kHz}$ y una desviación de frecuencia de 5 kHz , configuración que permitió evitar el solapamiento entre los picos de la señal en RF, asegurando así una correcta representación tanto en la versión de radiofrecuencia como en la de envolvente compleja (EC).

- En el análisis del diagrama de constelación, se observó que la variación de la frecuencia portadora f_c no alteró el patrón de la constelación. Esto se debe a que los cambios en f_c no modifican la relación de fase a frecuencia de la señal en la versión de Envolvente Compleja (EC). En contraste, al ajustar la desviación de frecuencia, los efectos fueron notoriamente evidentes. A medida que aumentaba la desviación de frecuencia, aparecían nuevos puntos en la constelación, correspondientes a los valores de fase y cuadratura de la señal.

4. Preguntas de control

Las preguntas de control permitieron reflexionar sobre aspectos clave en la conversión de señales de radiofrecuencia (RF) a la envolvente compleja (EC), así como su relación con diferentes esquemas de modulación digital. Un aspecto fundamental en este análisis fue el valor de SPS (Samples Per Symbol), esencial para representar correctamente las señales moduladas. Un valor adecuado de SPS asegura un ancho de banda suficiente, una óptima relación señal-ruido y una correcta sincronización en el receptor.

Asimismo, al estudiar el bloque “Multiply Const” en modulaciones como BPSK y FSK, se entendió su función en el control de parámetros clave como el desplazamiento de fase o la frecuencia de la portadora. En configuraciones específicas, como en el caso de BPSK con un valor de 1, este bloque podría considerarse innecesario sin alterar la señal resultante.

En las modulaciones OOK, BPSK y FSK, se observó que la ubicación y configuración de los bloques en el diagrama de flujo influye directamente en el comportamiento del sistema. Por ejemplo, en OOK, la señal modulante ingresa a la primera entrada del VCO, ya que regula la presencia o ausencia de la portadora. En cambio, en BPSK y FSK, la modulación afecta parámetros como la fase o la frecuencia, lo que justifica su conexión a la segunda entrada del VCO. Se propuso también la reubicación del filtro FIR interpolador antes de los VCO en

modulaciones BPSK y FSK. Aunque esta reconfiguración es viable, se enfatizó la necesidad de evaluar cuidadosamente sus efectos sobre la señal para evitar distorsiones y garantizar el cumplimiento de los objetivos de modulación.

Finalmente, se examinaron los límites prácticos de los parámetros de modulación, como el cálculo del valor máximo permitido para la frecuencia de la portadora en FSK, usando el teorema de Nyquist. Este análisis asegura que la frecuencia de muestreo sea la adecuada para evitar aliasing y preservar la integridad de la señal en el dominio RF. De manera similar, se evaluó el valor mínimo de SPS necesario para generar versiones RF en modulaciones como BPSK, considerando factores como la velocidad de los bits, la tasa de muestreo y los requisitos de filtrado.

5. Anexos

El siguiente link conduce al repositorio github donde se subieron todas las evidencias

https://github.com/duvangomez30/Com2_B1_G6

6. Conclusiones

- Cada sistema de modulación mostró características específicas al ser analizado en los dominios temporal, espectral y de constelación. La modulación OOK se caracterizó por su simplicidad en el uso de la portadora, BPSK evidenció cambios de fase notables, mientras que FSK presentó variaciones en la frecuencia como rasgo distintivo.
- Se concluyó que la frecuencia de la portadora no tiene impacto en la visualización del diagrama de constelación, dado que este se construye a partir de la Envolvente Compleja (EC), la cual se encuentra en banda base. Pero, la desviación de frecuencia sí afecta directamente dicha representación, alterando la forma en que se distribuyen los símbolos en el espacio de la constelación.
- En su formato de envolvente compleja (EC), la señal FSK se convierte en una herramienta crucial para el diseño, simulación y análisis de sistemas de comunicación dentro de plataformas de software. Esta representación facilita el modelado, la simulación y la demodulación mediante algoritmos ejecutados en entornos controlados, lo que permite desarrollar y evaluar sistemas de comunicación de manera eficiente, sin la necesidad de utilizar hardware especializado.



- La modulación FSK en el dominio RF es particularmente adecuada para aplicaciones que requieren una separación clara entre canales y una alta resistencia frente al desvanecimiento selectivo en frecuencia. Estas propiedades la hacen ideal para entornos como las comunicaciones móviles por radiofrecuencia, donde la variabilidad de la frecuencia ayuda a mitigar interferencias y mejorar la ca-

lidad de la transmisión.

Referencias

- [1] ElectroAgenda. La envolvente compleja: implementación. [Online]. Available: https://electroagenda.com/es/envolvente-compleja-implementacion/#2_Implementacion_de_la_Envolvente_Compleja