

De Radio Frecuencia a la Envolvente Compleja

Santiago Andrés Ibañez Ramírez Nicolás David Martínez Cristancho Jonathan Mauricio Rojas Rodriguez
2211258 2212269 2212280
santiago2211258@correo.uis.edu.co nicolas2212269@correo.uis.edu.co jonathan2212280@correo.uis.edu.co

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial De Santander
Bucaramanga, Colombia

Repositorio Github

Resumen—This practice focused on the conversion of radiofrequency (RF) signals into their complex envelope (EC) representation using GNU Radio. Through the analysis of digital modulation schemes such as OOK, BPSK, and FSK, the advantages of working with EC were highlighted, particularly in terms of computational efficiency and signal clarity. Specific flowgraphs were implemented for each modulation type, allowing observations in both the time and frequency domains, as well as in the signal constellation. The practice also involved an in-depth study of custom blocks like `e_RF_VCO_ff` and `e_EC_VCO_fc`, enhancing the understanding of the modulation process.

I. INTRODUCCIÓN

El procesamiento de señales en comunicaciones digitales modernas requiere herramientas que simplifiquen su análisis y manipulación. Una de estas herramientas es la envolvente compleja (EC), una representación matemática que permite tratar señales moduladas de una forma más eficiente que su forma en radiofrecuencia (RF) original. La EC separa la información en dos componentes ortogonales, I (in-phase) y Q (quadrature), facilitando operaciones como demodulación, detección de eventos y visualización de constelaciones.

La presente práctica tiene como objetivo principal afianzar el concepto de la envolvente compleja a partir de señales de RF, utilizando el entorno de desarrollo GNU Radio. Se construyeron e interpretaron flujogramas para diferentes esquemas de modulación digital, como OOK, BPSK y FSK, analizando sus comportamientos tanto en RF como en EC. Asimismo, se abordó la configuración y análisis de bloques específicos diseñados para estas conversiones, proporcionando una perspectiva técnica y aplicada del proceso de transformación de señales.

II. METODOLOGÍA

En cuanto al procedimiento realizado para la ejecución de la segunda práctica de laboratorio se procedió como sigue:

II-A. Análisis de modulación OOK (On-Off Keying)

Se ejecutó un flujograma original para observar el comportamiento de la señal OOK tanto en su forma RF como en su representación en Envolvente compleja. Las observaciones se hicieron en los dominios de frecuencia y tiempo, comparando las formas de onda y espectros de cada una.

II-B. Estudio de bloques personalizados

Se analizaron los bloques de `e_RF_VCO_ff` y `e_EC_VCO_fc`, revisando su código en Python mediante el editor. Se redactó una breve explicación de cada bloque, con entradas, salidas y recomendaciones de uso.

II-C. Adaptación del sistema a modulación BPSK

Se modificó el flujograma para permitir la modulación BPSK tanto en RF como en EC. Se activaron y reconfiguraron bloques desactivados, realizando pruebas de visualización en los distintos dominios y analizando el comportamiento de la señal.

II-D. Adaptación del sistema a modulación FSK

De igual forma, se configuró el sistema para generar señales FSK en ambas representaciones. Se observaron los efectos de variar la frecuencia portadora y la desviación de frecuencia sobre la señal en el dominio del tiempo, la frecuencia y la constelación.

II-E. Análisis de resultados y documentación

Se recopilaron capturas de pantalla y datos de cada experimento, los cuales fueron consignados en el informe. Además, se respondieron preguntas de control relacionadas con el diseño y comportamiento de los flujogramas, con el fin de reforzar la comprensión conceptual. aca no se explica lo que se hizo sino lo que se obtuvo.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III-A. Análisis de la señal OOK

En esta parte, se comparó la señal OOK modulada en radiofrecuencia (RF) con su representación en envolvente compleja (EC), observando los componentes I (In-phase) y Q (Quadrature). Se compararon los espectros de frecuencia para ambas representaciones, se realizaron pruebas incrementando la frecuencia de la portadora en el modulador RF y se realizaron pruebas incrementando la frecuencia de la portadora en el modulador RF.

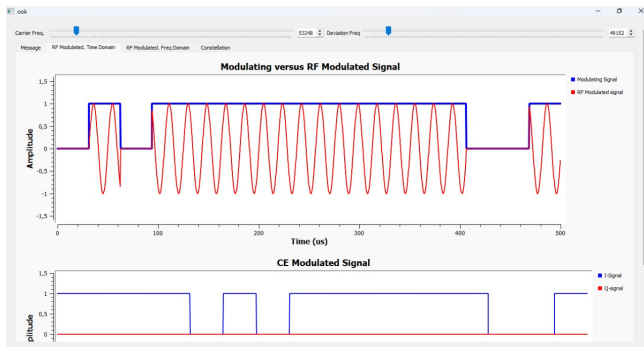


Figura 1. Señales RF y EC para OOK.

En el dominio del tiempo, la señal OOK en versión RF muestra una portadora constante que aparece únicamente cuando se transmite un '1', mientras que durante los '0' no se transmite ninguna señal, es decir en el dominio del tiempo, esto se observa como una onda sinusoidal continua durante los intervalos de bit '1' y un nivel plano (sin señal) durante los intervalos de bit '0'. En cambio, en la representación en envolvente compleja (EC), el componente I refleja directamente la presencia o ausencia de información digital, mostrando amplitud distinta de cero solo cuando hay un '1' y permaneciendo en cero para los '0'; el componente Q se mantiene en cero, ya que no hay variación en fase.

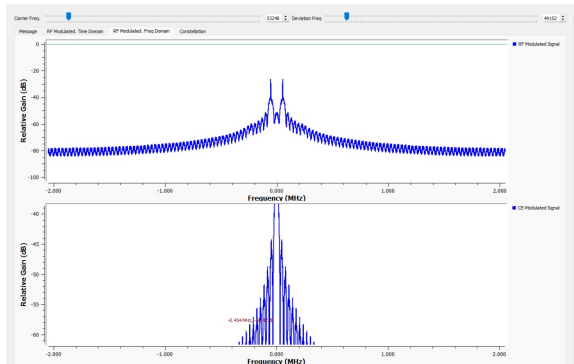


Figura 2. Señales RF y EC para OOK en frecuencia.

En el dominio de la frecuencia, la señal OOK en versión RF presenta un espectro centrado alrededor de la frecuencia portadora, con componentes adicionales. La señal en envolvente compleja (EC), al estar en banda base, muestra un espectro centrado en 0 Hz.

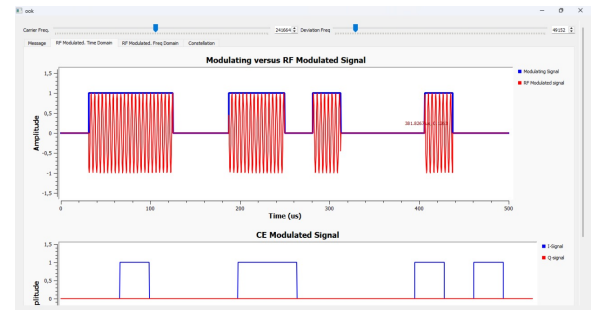


Figura 3. Señales RF y EC para OOK en tiempo variando frecuencia portadora.

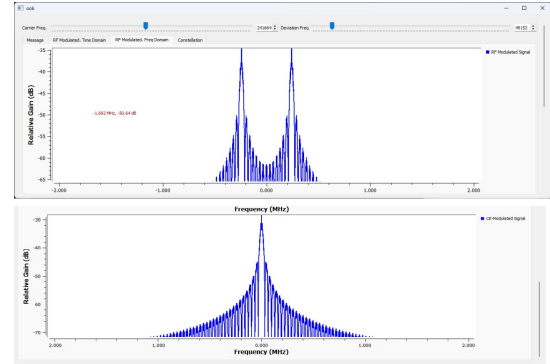


Figura 4. Señales RF y EC para OOK en frecuencia variando frecuencia portadora.

Al variar la frecuencia de la portadora, se observó que en la señal RF el espectro se desplaza proporcionalmente hacia frecuencias más altas, la señal presentó ciclos de mayor frecuencia. En cambio, la señal en envolvente compleja (EC) no se ve afectada por este cambio, ya que está en banda base y su contenido depende solo de la información modulada. Esto confirma que la EC es independiente de la frecuencia portadora como se esperaba.

III-B. Análisis de los bloques $e_{RF_VCO_ff}$ y $e_{EC_VCO_fc}$

Una vez hecho el análisis de los bloques se hicieron los respectivos comentarios para cada uno de ellos, donde se explica a detalle su funcionamiento.

```

"""This block is a RF VCO and works as following:
The custom block e_RF_VCO_ff implements a
Voltage-Controlled Oscillator (VCO) to generate
a modulated radiofrequency(RF) signal from two
input signals: an amplitude signal (A) and a phase
signal(Q).The core operation of the block involves
producing a discrete signal y[nTs] by multiplying
the amplitude A with a cosine function, which
generates the modulated carrier. In the formula,
fc represents the carrier frequency, Ts is the sampling
period defined as Ts=1/fs and n is the discrete time
index. In the code implementation, a time vector
generated using the np.linspace function is employed
to simulate the temporal continuity of the process
through the self.n_m accumulator. This vector represents
the sampling instants required to compute the modulating
cosine function. he purpose of this block is to facilitate
the conversion of baseband signals to the
radiofrequency (RF) domain."""

```

Figura 5. Texto para el bloque $e_{RF_VCO_ff}$.

""This block is a CE VCO or baseband VCO and works as following: The e_CE_VCO_fc block is a VCO designed to operate in the baseband domain, generating a complex envelope from two input signals: a magnitude $A(t)$ and a phase $Q(t)$. In the formula for the complex envelope, $A(t)$ represents the in-phase component, while $Q(t)$ corresponds to the instantaneous phase (or the quadrature component, when interpreted from the perspective of an I/Q modulator). The output is therefore a complex signal that encapsulates all amplitude and phase modulation information, enabling the signal to be analyzed or transmitted without the need to upconvert it directly to the RF domain.""

Figura 6. Texto para el bloque e_EC_VCO_fc.

III-C. Análisis de la modulación BPSK

Se realizaron los respectivos cambios en el diagrama de bloques para obtener la modulación BPSK.

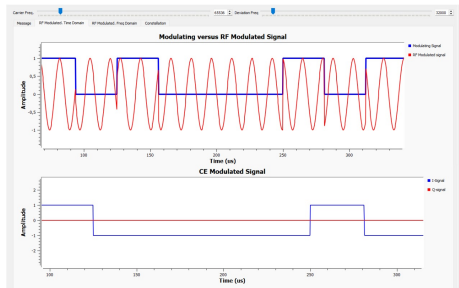


Figura 7. BPSK en el dominio del tiempo.

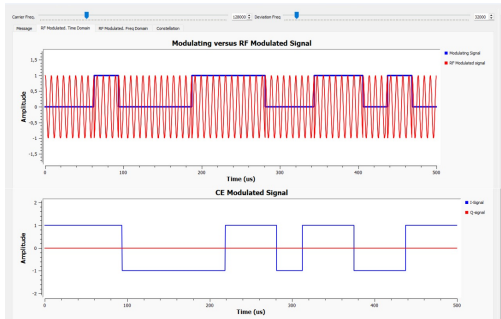


Figura 8. BPSK en el dominio del tiempo variando la frecuencia portadora.

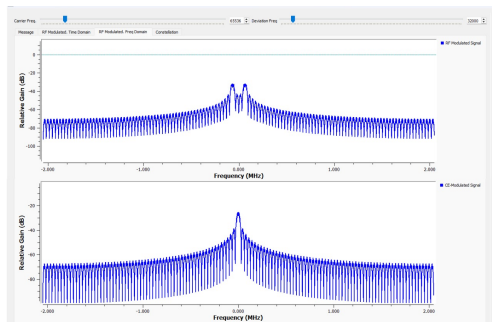


Figura 9. BPSK en el dominio de la frecuencia.

La principal diferencia entre ambas representaciones radica en la presencia de la señal portadora. En la versión RF, la información binaria se modula sobre una portadora senoidal, generando cambios de fase de 0° o 180° que se observan como inversiones en la forma de onda en el dominio del tiempo. Esta modulación desplaza el espectro de la señal alrededor de la frecuencia de la portadora, lo cual es necesario cuando se requiere transmitir por medios no guiados, como el aire.

Por otro lado, en la versión EC no se utiliza portadora. En su lugar, la señal se representa en banda base mediante los componentes I (In-phase) y Q (Quadrature). En el caso de BPSK, solo se utiliza el componente I, que alterna entre 1 y -1 dependiendo del bit transmitido, mientras que Q permanece en cero. Esto permite visualizar directamente el cambio de fase sin necesidad de interpretar una señal senoidal.

III-D. Análisis de la modulación FSK

Para la modulación FSK (Frequency shift keying) se modificó el flujograma agregando los bloques add_const y multiply_const para convertir la señal a bipolar antes del bloque interpolating, y luego se agregó e_Acum y multiply_const antes de los bloques de modulación de EC y RF tal y como se sugiere modificarlos, para el caso específico de esta modulación se tuvo que las entradas de amplitud de la señal tanto como para el bloque e_RF_VCO_ff como para el e_EC_VCO_fc fueron del bloque constant source igual a uno, y la entrada Q (fase) fue la señal, esto para controlar la frecuencia en el caso de la señal RF y la fase en el caso de la señal EC, ya que en esta modulación 2-FSK solo tiene dos frecuencias, cuando la señal vale 1 y cuando vale -1, en las siguientes imágenes se puede observar los diferentes casos de las señales en el dominio del tiempo.

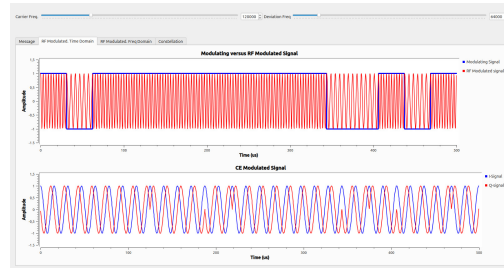


Figura 10. FSK en el dominio del tiempo. La señal RF y CE en el tiempo con una deviation frequency de 64KHz y una fc de 128KHz

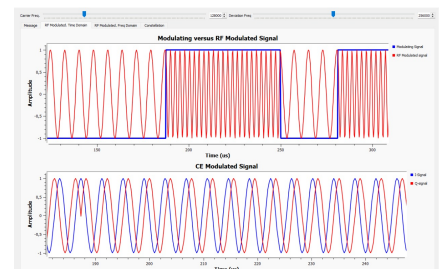


Figura 11. FSK en el dominio del tiempo. La señal RF y CE en el tiempo con una deviation frequency de 256KHz y una fc de 128KHz

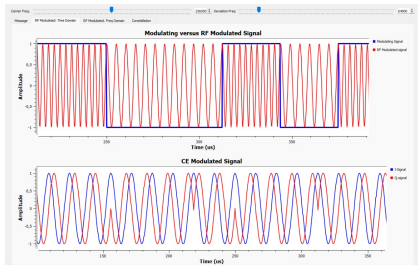


Figura 12. FSK en el dominio del tiempo. La señal RF y CE en el tiempo con una deviation frequency de 64KHz y una fc de 256KHz

Como se puede observar a medida que se aumenta la deviation frequency se asentúa más la diferencia entre la frecuencia f_0 y f_1 o sea entre las dos frecuencias, mientras que la frecuencia de la portadora solo afecta a la frecuencia base o frecuencia cuando la señal es cero.

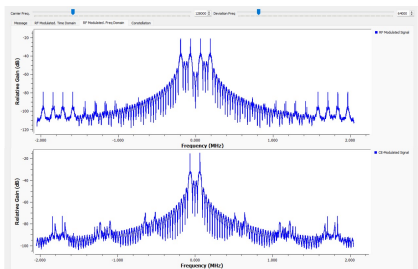


Figura 13. FSK en el dominio de la frecuencia. Con una deviation frequency de 64KHz y una fc de 128KHz

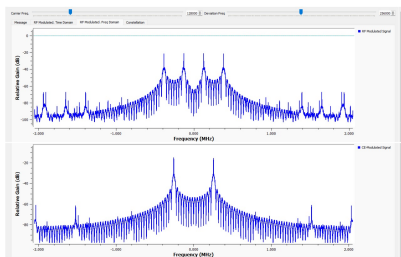


Figura 14. FSK en el dominio de la frecuencia. Con una deviation frequency de 256KHz y una fc de 128KHz

Como la frecuencia f_c es la portadora, la frecuencia base de la modulación FSK y la deviation frequency es la desviación de las frecuencias entre símbolos, quiere decir que a mayor deviation frequency tanto la señal RF como la FC consumirán un mayor ancho de banda, y si a eso se le suma el ancho de banda de la señal base con f_c aumentaría mucho el ancho de banda, entre mas símbolos posea la señal mayor tendrá que ser la deviation frequency para evitar ruido por solapamiento y por ende mayor ancho de banda.

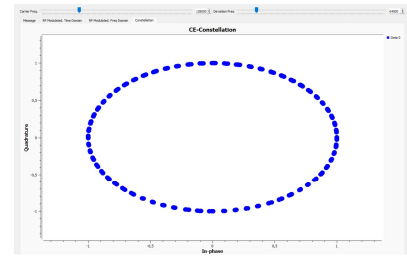


Figura 15. Constelación de la FSK con f_c de 128KHz y deviation frequency de 64KHz

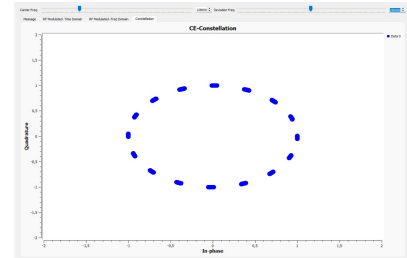


Figura 16. Constelación de la FSK con f_c de 128KHz y deviation frequency de 256KHz

Particularmente un diagrama de constelación (plano IQ), de una señal FSK no produce puntos fijos como en modulaciones por fase o amplitud. La señal modulada genera trayectorias circulares u órbitas en el plano complejo, ya que la frecuencia constante dentro de cada símbolo provoca una rotación continua de la fase Q. La frecuencia portadora (f_c) no cambia la forma de la constelación, pero aumenta la velocidad de rotación de las trayectorias en el plano IQ. Una deviation frequency baja hace que las trayectorias se solapen y esto introduce más error. Una deviation frequency alta, mejora la separabilidad de los símbolos (pero usa más ancho de banda).

IV. PREGUNTAS Y RESPUESTAS

IV-A. 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?

Para obtener correctamente una señal modulada en paso-banda, es necesario utilizar un valor alto del parámetro SPS. Un valor de SPS es apropiado cuando permite representar adecuadamente la señal modulada sin distorsión, evitando aliasing y conservando la forma de onda esperada.

IV-B. ¿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?

Si el valor es 1, el bloque no altera la señal, por lo que funcionalmente es equivalente a retirarlo. Sin embargo, su presencia puede tener sentido si se prevé modificar la amplitud más adelante o para mantener estructura en el diseño del flujograma.

IV-C. ¿Cómo se puede deducir la fórmula que hay dentro del bloque “Multiply Const” que se activa para la modulación FSK?

La fórmula se deduce a partir de la relación entre la señal binaria modulante y la desviación de frecuencia deseada para ello es necesario entender la forma de la señal modulada en FSK. Esto implica que no solo se debe realizar una suma acumulativa sobre el mensaje, sino que también es necesario escalarlo con la desviación de frecuencia y el periodo de muestreo.

IV-D. ¿Por qué el bloque “Constant Source” se configura como cero para la modulación OOK pero no para la BPSK y la FSK?

El bloque Constant Source se establece en cero cuando se implementa la modulación OOK, ya que esta solo utiliza la componente en fase (I) y no presenta cambios en la fase de la señal. En otras palabras, como la OOK es una modulación puramente de amplitud digital, no requiere componente Q. La información está en la presencia o ausencia de la portadora, por lo que no se requiere un valor constante adicional.

IV-E. ¿Por qué en la modulación OOK la señal modulante entra por la primera entrada (superior) de los VCO, mientras que en BPSK y FSK entra por la segunda (inferior)?

En la modulación OOK, la señal binaria modulante se conecta a la primera entrada del bloque VCO porque su propósito es activar o desactivar la portadora dependiendo del valor del bit. En contraste, en modulaciones como BPSK y FSK, la señal entra por la segunda entrada del VCO, ya que la información se codifica mediante variaciones de fase o frecuencia, no mediante encendido o apagado de la portadora.

IV-F. Para el caso de la modulación BPSK, ¿sería posible reubicar el bloque “Interpolating FIR Filter” para que quede inmediatamente antes del VCO?

Aunque es posible mover el bloque Interpolating FIR Filter, esto afectará la amplitud de la señal en banda base. Sin embargo, dicho cambio puede implementarse considerando que ese nuevo valor se utilizará en la modulación como un nivel de offset. Su ubicación influye en cómo se interpola y suaviza la señal antes de ser modulada.

IV-G. Para el caso de la modulación FSK, ¿sería posible reubicar el bloque “Interpolating FIR Filter” para que quede inmediatamente antes del VCO?

En el caso de la modulación FSK, no fue posible colocar el bloque Interpolating FIR Filter justo antes del VCO, ya que este filtro debe actuar sobre la señal de entrada antes de ser modulada. Si se ubica justo antes del VCO, estaría operando sobre la portadora o una señal ya modulada, por lo cual no podría hacer su función principal de interpolar y suavizar la señal de datos.

IV-H. OTRAS PREGUNTAS

Con lo aprendido, es posible diseñar un VCO en GNU Radio que reciba una señal de frecuencia y otra de amplitud, combinando bloques como Signal Source, VCO y Multiply para generar la señal modulada. En cuanto a la modulación FSK, la frecuencia máxima de la portadora en versión RF está limitada por la frecuencia de muestreo, ya que no debe superar la mitad de esta (teorema de Nyquist) para evitar aliasing. Para la generación de la EC, la desviación de frecuencia también debe mantenerse dentro del ancho de banda útil en banda base. Finalmente, en el caso de la modulación BPSK, el valor mínimo de SPS depende de cuántas muestras se requieren por ciclo de la portadora para representarla con fidelidad; típicamente se necesitan entre 8 y 10 muestras por ciclo.

V. CONCLUSIONES

- Para lograr una modulación clara y eficiente, es crucial ajustar correctamente la frecuencia de la portadora junto con la desviación de frecuencia. Un mal balance puede generar solapamiento en el espectro, dificultando la separación de símbolos y reduciendo la calidad de la transmisión.
- Se comprobó que, en modulaciones como OOK, BPSK y FSK, la EC permite una visualización más clara de los símbolos transmitidos, especialmente en el dominio del tiempo y la constelación.
- La correcta configuración de parámetros como la frecuencia de la portadora, la desviación en FSK y el valor de SPS resulta fundamental para obtener modulaciones definidas y evitar problemas como solapamiento espectral o aliasing.
- El análisis espectral evidenció cómo la EC concentra su contenido en banda base, lo que la hace más eficiente en términos de ancho de banda y procesamiento digital comparado con su versión en RF.

REFERENCIAS

- [1] Homero Ortega Boda, Oscar Mauricio Reyes Torres. *Comunicaciones Digitales basadas en radio definida por software*. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
- [2] GNU Radio. *Python Module - GNU Radio*. Disponible en: https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Python_Module
- [3] Repositorio en GitHub. Disponible en: https://github.com/Jomao03/com2_B1_G3