

Informe 3: DE RADIOFRECUENCIA A LA ENVOLVENTE COMPLEJA

Humberto José Contreras Afanador - 2210404

Diego Andrés García Díaz - 2195533

Darwin Camilo Sánchez Gallo - 2202335

URL Repositorio: https://github.com/dagdUIS/CommunicationsII_2024_2_G1 [1]

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

18 de noviembre de 2024

Abstract

In the laboratory practice, an analysis of the conversion of Radio Frequency (RF) signals to Complex Envelope (CE) representation was carried out using GNU Radio software. This process allowed understanding the importance of the EC representation in communication systems, since it facilitates the analysis and design of digital modulations. Specific flowcharts that integrated RF-EC conversion blocks were implemented, using different types of modulations and thus observing their characteristics in the complex domain. In addition, experimental tests were performed and control questions were solved in order to evaluate and reinforce the understanding of the RF-EC conversion concept and its impact on the efficiency of signal analysis in communications systems.

Index terms: Radio Frequency (RF), Complex Envelope (CE), Digital Modulations.

1 Introducción

La conversión de señales de Radiofrecuencia (RF) a su representación en Envoltente Compleja (EC) es un concepto fundamental en sistemas de comunicaciones digitales. Esta técnica permite transformar señales reales de pasa banda en señales complejas de banda base, facilitando el análisis y procesamiento de las modulaciones digitales. La representación en EC es especialmente útil en sistemas de comunicaciones digitales, ya que simplifica operaciones como la detección, filtrado y recuperación de la información, permitiendo un diseño más eficiente de transmisores y receptores. En este contexto, GNU Radio se presenta como una herramienta clave para implementar y visualizar este proceso, proporcionando un entorno flexible y poderoso para el diseño y simulación de los sistemas de comunicaciones. [2]

Además, la práctica incluyó el estudio de modulaciones digitales como OOK (On-Off Keying), BPSK (Binary Phase Shift Keying) y FSK (Frequency Shift Keying), así como modulaciones basadas en constelaciones, como QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Estas técnicas son ampliamente utilizadas en sistemas de transmisión, ya que permiten optimizar el uso del espectro y garantizar la integridad de la señal en diversos entornos de comunicación. Al analizar estas técnicas en los dominios RF y EC, se pretende profundizar en los principios esenciales de transmisión y recepción, destacando cómo la envoltente compleja facilita el estudio y la representación eficiente de las señales moduladas, tanto en su diseño como en su implementación práctica. [3]

2 Metodología

2.1 Diagrama de bloques

Mediante el diagrama de la Figura 1 se modela un sistema para la conversión de señales de radiofrecuencia a su representación para la envoltente compleja por medio del software GNU Radio.

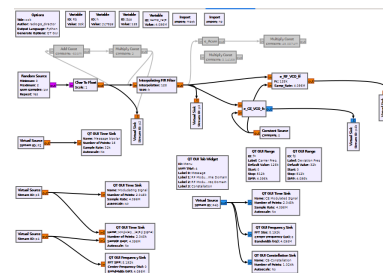


Fig. 1: Diagrama de bloques para conversión RF a EC.



- **RF Modulated, Dominio del tiempo:**

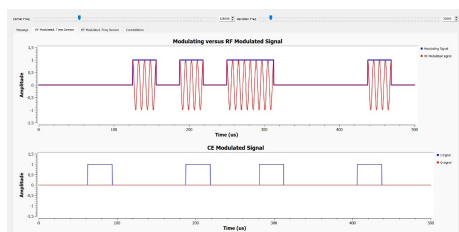


Fig. 2: Señal modulada en EC y RF, $f_c = 128kHz$.

- **RF Modulated, Dominio de la frecuencia:**

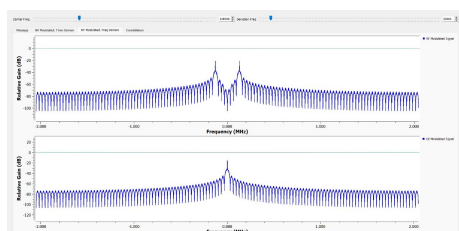


Fig. 3: Señal con $f_c = 128kHz$.

- **Cambio en frecuencia portadora para RF Modulated en el dominio del tiempo:** La Figura 4 presenta una señal en radio frecuencia la cual posee una frecuencia de portadora de 500 kHz la cual se presenta en el dominio del tiempo.

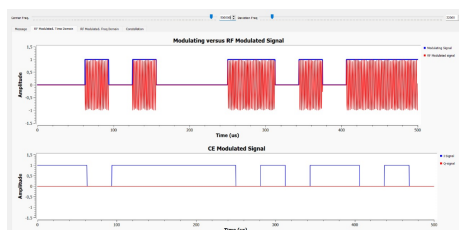


Fig. 4: Señal modulada en EC y RF, $f_c = 500kHz$.

- **Cambio en frecuencia portadora para RF Modulated en el dominio de la frecuencia:** La Figura 5 presenta una señal en radio frecuencia la cual posee una frecuencia de portadora de 503 kHz la cual se presenta en el dominio de la frecuencia.

2.2 Análisis de bloques RF_VCO_ff y EC_VCO_fc

Para los bloques RF_VCO_ff y EC_VCO_fc, se abre el editor para analizar el código que describe el

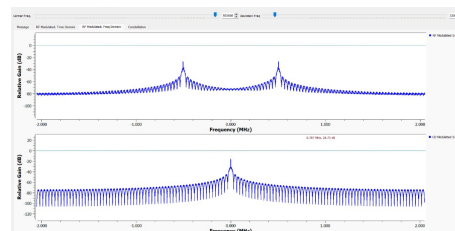


Fig. 5: Señal con $f_c = 500kHz$.

funcionamiento de cada bloque, escrito en Python. Durante el análisis, se deberá explicar detalladamente su funcionamiento, destacándolo mediante comentarios directamente en el código.

```
class blk(gr.sync_block):
    """This block is a RF VCO and works as following: This block implements a radio
    frequency Voltage Controlled Oscillator (VCO) that generates a phase modulated
    sinusoidal signal. The frequency and phase of the output signal are set as a function
    of the amplitude (A) and phase (Q) inputs, both of type float32. The carrier frequency,
    defined by parameter fc, has a default value of 128,000 Hz, while the sampling rate,
    (samp_rate) is 320,000 Hz by default. The output signal, also of float32 type, is
    modulated according to the inputs, being useful for applications such as modulated
    signal transmission tests or reference generation in communication systems.
    For proper operation, it is recommended that the sampling rate be at least twice the
    carrier frequency, avoiding aliasing, and that the phase (Q) values be maintained between
    -pi and pi to ensure correct modulation."""
```

Fig. 6: Descripción del bloque RF_VCO_ff.

```
class blk(gr.sync_block):
    """This block is a CE VCO or baseband VCO and works as following: This block implements
    a Baseband Voltage Controlled Oscillator (CE VCO or baseband VCO), which generates a complex
    output signal in I/Q format, allowing phase modulation. The output signal, of complex4 type,
    has a magnitude modulated by the amplitude input (A) and a phase adjusted by the phase input (Q),
    both of float32 type. This block is particularly useful in baseband communications applications
    where I/Q modulated signals are required to represent quadrature components in phase or amplitude
    modulation systems such as QPSK or QAM.

    The amplitude of the output signal is proportional to the input A, while the phase, controlled by Q,
    must be expressed in radians and maintained in a range between -pi and pi for proper representation.
    This block can be easily integrated with other modules that process complex signals in communication
    systems and is ideal for RF and baseband data transmission applications. It is recommended to adjust
    the amplitude and phase values according to specific application requirements to ensure optimum performance."""
```

Fig. 7: Descripción del bloque EC_VCO_fc.

Las Figuras 6 y 7 describen detalladamente el funcionamiento de los bloques mencionados previamente, proporcionando una explicación paso a paso de su operación.

2.3 BPSK

Se reconfiguró el flujograma según las indicaciones de la guía, activando los bloques desactivados y realizando las interconexiones necesarias para que funcione como un modulador BPSK en versiones RF y EC. Si no se logra, se procederá con la interconexión indicada a la derecha del bloque "Interpolating FIR Filter" y se ajustará el valor de "Constant Source" para que represente la amplitud de la señal modulada en lugar de la fase. Después, se realizarán pruebas similares a las del punto 1, pero aplicadas a la modulación BPSK.

Se realizaron diferentes pruebas con frecuencias bajas y altas, en este caso se observa en las Figuras 8 (dominio del tiempo) y 9 (dominio de la frecuencia) que se realizó la prueba con una frecuencia de $f_c = 128kHz$:

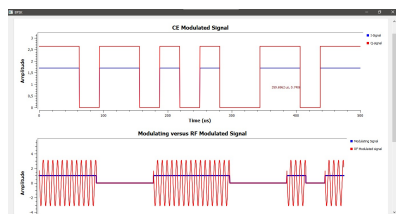


Fig. 8: Señal modulada en EC y RF, $f_c = 128kHz$.

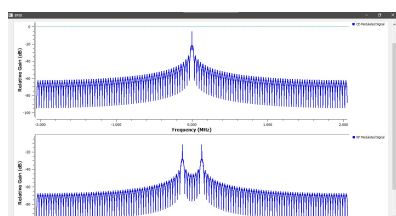


Fig. 9: Señal con $f_c = 128kHz$.

2.4 FSK

Inicialmente, se modificó el flujograma según las indicaciones en la guía, también se realizaron una serie de pruebas variando la frecuencia de la portadora f_c y la desviación de frecuencias, observando el comportamiento de la señal modulada en el *dominio del tiempo* (pestaña "Modulated-Time") y en el *dominio de las frecuencias* (pestaña "Modulated-Freq"). Se registraron evidencias gráficas, además de cómo acondicionar la señal para que los VCO generen modulación FSK en versiones RF y EC. Finalmente, se propuso un valor para la frecuencia portadora y la desviación de frecuencias que minimice el solapamiento en el espectro.

De las diferentes pruebas que se realizaron, se observa una de ellas en las Figuras 10 y 11, donde se realiza la prueba con una frecuencia portadora de $f_c = 130kHz$.

3 Análisis de resultados

- **Funcionamiento del Flujograma Propuesto:** Se realizó un análisis al flujograma propuesto, enfocándose en el comportamiento de la señal modulada en RF y EC. Por medio de distintas pruebas, se ajustaron parámetros del diagrama de bloques, entre ellas la variación en la frecuencia de portadora y la

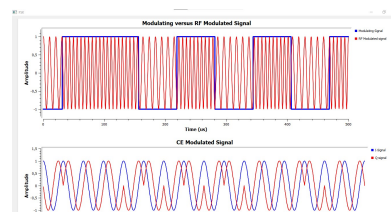


Fig. 10: Señal modulada en EC y RF, $f_c = 130kHz$.

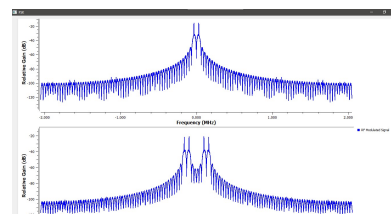


Fig. 11: Señal con $f_c = 130kHz$.

desviación de frecuencia, del cual se identificó el cambio en el dominio, el tiempo y la frecuencia para RF y EC.

- **Análisis de señales RF y EC:** Dado que las señales obtenidas en los dominios del tiempo y la frecuencia, se muestran las características distintivas de la modulación OOK en sus versiones RF y EC. En el caso de la modulación OOK en RF, la frecuencia portadora es activada o desactivada en función del mensaje digital de entrada: un "1" activa la portadora, mientras que un "0" la desactiva. Por otro lado, en la versión EC, la modulación se realiza en banda base, generando una señal compleja con componentes en cuadratura (I y Q), lo que refleja directamente las variaciones del mensaje digital sin una portadora de alta frecuencia.

Asimismo, al comparar las Figuras 3 y 5 con las Figuras 2 y 3, se observa cómo el incremento de la frecuencia portadora a 500 kHz afecta las señales moduladas. En el caso de la versión RF, el aumento de la portadora modifica la señal sinusoidal en el dominio del tiempo. Para la versión EC, aunque no se utiliza una portadora en banda base, la envolvente compleja se ve influenciada por las características de la modulación, destacando la relación entre la magnitud y la fase de la señal modulada. Estos cambios evidencian cómo la frecuencia portadora y el dominio en el que opera cada versión impactan la representación de la señal.

- Este bloque implementa un Oscilador Controlado por Voltaje (VCO) de radiofrecuencia que genera



una señal sinusoidal modulada en fase. La frecuencia y la fase de la señal de salida se ajustan en función de las entradas de amplitud (A) y fase (Q), ambas del tipo *float32*. La frecuencia portadora, definida por el parámetro f_c , tiene un valor predeterminado de 128.000Hz , mientras que la tasa de muestreo es de 320.000Hz por defecto. La señal de salida, también de tipo *float32*, es modulada según las entradas, siendo útil para aplicaciones como pruebas de transmisión de señales moduladas o generación de referencias en sistemas de comunicación. Para un funcionamiento adecuado, se recomienda que la tasa de muestreo sea al menos el doble de la frecuencia portadora, evitando el aliasing, y que los valores de la fase (Q) se mantengan entre $-\pi$ y π para asegurar una modulación correcta.

- Este bloque es un VCO CE o VCO de banda base y funciona de la siguiente manera: Este bloque implementa un oscilador controlado por voltaje de banda base (CE VCO o VCO de banda base), que genera una señal de salida compleja en formato I/Q, permitiendo la modulación de fase. La señal de salida, de tipo *complex64*, tiene una magnitud modulada por la entrada de amplitud (A) y una fase ajustada por la entrada de fase (Q), ambas de tipo *float32*. Este bloque es particularmente útil en aplicaciones de comunicaciones de banda base donde se requieren señales moduladas I/Q para representar componentes en cuadratura en sistemas de modulación de fase o amplitud como QPSK o QAM.

La amplitud de la señal de salida es proporcional a la entrada A, mientras que la fase, controlada por Q, debe expresarse en radianes y mantenerse en un rango entre $-\pi$ y π para una representación adecuada. Este bloque se puede integrar fácilmente con otros módulos que procesan señales complejas en sistemas de comunicación y es ideal para aplicaciones de transmisión de datos de RF y banda base. Se recomienda ajustar los valores de amplitud y fase según los requisitos específicos de la aplicación para garantizar un rendimiento óptimo.

- Un **modulador BPSK** en RF opera modulando directamente la fase de una portadora de alta frecuencia, alternando entre dos estados, típicamente 0° y 180° , según el bit de entrada. Este tipo de modulación es fundamental para la transmisión inalámbrica, ya que permite que la señal se propague a través del espectro electromagnético, siendo adecuada para sistemas que requieren alcance físico y robustez frente a interferencias. Sin embargo, trabajar con señales

de tipo RF implica mayores exigencias de hardware debido a las altas frecuencias involucradas, lo que puede incrementar la complejidad del sistema.

Por otro lado, un modulador BPSK en EC (Envolvente Compleja) realiza la modulación en banda base, donde no se utiliza una portadora explícita. En esta versión, la señal se representa en el dominio complejo mediante componentes en cuadratura (I y Q), que reflejan las variaciones de fase directamente en la señal compleja. Esto simplifica el procesamiento, ya que permite realizar análisis y simulaciones mediante algoritmos digitales, reduciendo la dependencia del hardware especializado. Además, el uso de la EC facilita la implementación de sistemas de comunicación modernos al optimizar el diseño de transmisores y receptores digitales.

- Al revisar la **modulación FSK** se realizaron las diferentes pruebas teniendo en cuenta dos casos: primero, cambiando la frecuencia de la portadora y manteniendo constante la desviación de frecuencia, segundo, manteniendo constante la frecuencia de la portadora y cambiando la desviación de frecuencia, para ello se realizó el análisis desde la pestaña donde se observa el dominio de la frecuencia, para el primer caso se observó que la diferencia de frecuencia necesaria para identificar el cambio de bit se mantiene constante, para el segundo caso la diferencia de frecuencia necesaria para identificar algún cambio en el valor del bit cambiaba de forma directa en función de la desviación de frecuencia. Finalmente, se siguió el mismo procedimiento para analizar el *diagrama de constelación* de la señal FSK.

Luego de realizar las diferentes pruebas se propuso una frecuencia portadora de $f_c = 50\text{kHz}$ y una desviación de frecuencia de 5kHz , con lo que se logra evitar el solapamiento en los picos de señal en radiofrecuencia, logrando una correcta visualización de la modulación para RF y EC.

- Para el análisis del **diagrama de constelaciones** se observó que al cambiar la frecuencia de f_c no se produce ningún cambio en el patrón que tiene la constelación, ya que las alteraciones en la frecuencia f_c no cambian la relación de fase a frecuencia de la señal en EC. Cuando se cambiaba la desviación de frecuencia el efecto observado fue evidente ya que cuando aumentaba la desviación, se observaban puntos nuevos correspondientes a la fase y cuadratura de la señal.



4 Preguntas de control

Las preguntas de control permitieron reflexionar sobre aspectos fundamentales de la conversión de señales de radiofrecuencia (RF) a la envolvente compleja (EC) y su relación con diversas modulaciones digitales. Un punto clave fue el valor de SPS (*Samples Per Symbol*), indispensable para representar correctamente las señales moduladas. Un SPS adecuado garantiza un ancho de banda suficiente, una relación señal-ruido óptima y una sincronización precisa en el receptor. Además, al analizar el bloque “Multiply Const” en modulaciones como BPSK y FSK, se comprendió que este controla parámetros esenciales como el desplazamiento de fase o la frecuencia de la portadora, y que en configuraciones específicas (por ejemplo, un valor de 1 en BPSK), podría ser equivalente a eliminarlo sin alterar la señal resultante.

En modulaciones como OOK, BPSK y FSK, se observó cómo la ubicación y configuración de los bloques en el flujograma afectan el comportamiento del sistema. Por ejemplo, en OOK, la señal modulante entra por la primera entrada del VCO, ya que controla directamente la presencia o ausencia de la portadora. En contraste, en BPSK y FSK, la modulación afecta parámetros como la fase o la frecuencia, lo que justifica su entrada por la segunda terminal del VCO. También se planteó la posibilidad de reubicar el filtro FIR interpolador antes de los VCO en modulaciones BPSK y FSK. Aunque esto es factible, se subrayó la necesidad de evaluar cuidadosamente el impacto en la señal para evitar distorsiones y asegurar que los objetivos de la modulación se cumplan.

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

5 Conclusiones

- La comparación entre las señales moduladas en RF y EC permitió identificar las variaciones que ocurren al modificar la frecuencia de la portadora y cómo

esta se comporta en función de los datos binarios del mensaje transmitido. Este análisis, realizado tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, evidenció la entrega de señales I/Q que reflejan las características de la modulación.

- La representación en EC facilita el análisis y diseño de modulaciones digitales al simplificar operaciones como detección, filtrado y recuperación de información al igual que permite estudiar señales moduladas en banda base en lugar de frecuencias de portadora altas, lo que mejora la eficiencia de procesamiento y análisis.
- En RF, la modulación incluye una portadora, mientras que en EC se representa directamente en banda base con componentes I/Q, y las variaciones como frecuencia portadora y desviación afectan distintivamente las características en ambos dominios.
- La modulación FSK en el dominio RF resulta especialmente adecuada para aplicaciones donde es crucial garantizar una clara separación entre canales y una alta robustez frente al desvanecimiento selectivo en frecuencia. Estas características la hacen ideal para entornos como las comunicaciones móviles por radiofrecuencia, donde la variación de la frecuencia permite mitigar interferencias y mejorar la calidad de la transmisión.
- En su versión de envolvente compleja (EC), la señal FSK se presenta como una herramienta valiosa para el diseño, simulación y análisis de sistemas de comunicación en plataformas de software. Esta representación facilita el modelado, simulación y demodulación mediante algoritmos ejecutados en entornos controlados, permitiendo desarrollar y probar sistemas de comunicación de manera eficiente sin la necesidad de recurrir a hardware especializado.

References

- [1] D. García, D. Sánchez, and H. Contreras, “Repositorio CommunicationsII_2024_2_G1.” [Online]. Available: https://github.com/dagdUIS/CommunicationsII_2024_2_G1
- [2] O. J. Tijero, “4 complex envelope of a bandpass signal.” [Online]. Available: <https://lms.uis.edu.co/ava/mod/resource/view.php?id=12961>
- [3] O. Tijero, “5 ook, bpsk and fsk.” [Online]. Available: <https://lms.uis.edu.co/ava/mod/resource/view.php?id=12962>