

Informe 3: DE RADIOFRECUENCIA A LA ENVOLVENTE COMPLEJA

Jairo Andrés Moreno Lamus - 2212903
Daniel Felipe Orduz Pinzón - 2202333
Ángel Ricardo Castro Jaimes - 2200501

URL Repositorio: https://github.com/DanielO1006/LAB_COMU2_G7/tree/Practica3

Abstract

This laboratory study investigated the conversion of Radio Frequency (RF) signals to Complex Envelope (CE) representations using GNU Radio, highlighting the CE's role in simplifying digital modulation analysis. Custom flowcharts integrated RF-to-CE conversion blocks to test modulations like OOK, BPSK, FSK, and QPSK, enabling comparative analysis of their time-frequency behavior. Experimental tests and conceptual exercises validated CE advantages, such as reduced computational complexity and improved spectral efficiency. Key outcomes included optimized parameters (e.g., carrier frequency, frequency deviation) to minimize spectral overlap and enhance signal integrity.

The results underscore CE's critical impact on efficient signal processing in digital communications, bridging theory with practical implementation.

I. INTRODUCCIÓN

La conversión de señales de Radiofrecuencia (RF) a su representación en Envoltura Compleja (EC) es esencial en comunicaciones digitales, ya que transforma señales reales de pasa banda en señales complejas de banda base. Esto simplifica operaciones como filtrado, detección y recuperación de información, optimizando el diseño de transmisores y receptores. Herramientas como GNU Radio permiten implementar y visualizar este proceso, ofreciendo un entorno flexible para simular sistemas de comunicaciones [2].

Además, se analizaron modulaciones digitales como OOK, BPSK, FSK y QPSK, técnicas clave para optimizar el espectro y garantizar la integridad de la señal. Al estudiar estas modulaciones en los dominios RF y EC, se destaca cómo la envoltura compleja facilita el análisis eficiente de señales moduladas, tanto en diseño teórico como en aplicaciones prácticas [3].

II. METODOLOGÍA

II-A. 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 envoltura compleja por medio del software GNU Radio.

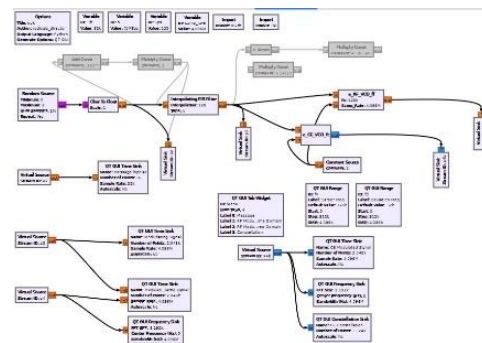


Figura 1: Diagrama de bloques para conversión RF a EC.



Figura 2: Señal modulada en EC y RF con una frecuencia portadora de 128 kHz, representada en el dominio del tiempo.

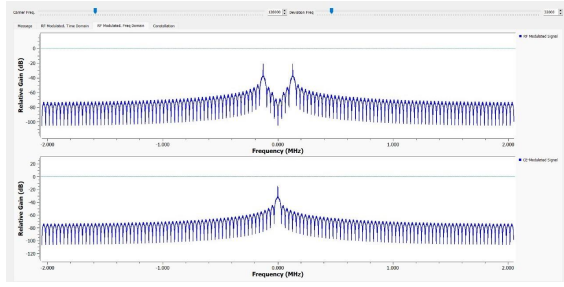


Figura 3: Espectro de la señal modulada en EC y RF con una frecuencia portadora de 128 kHz.

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

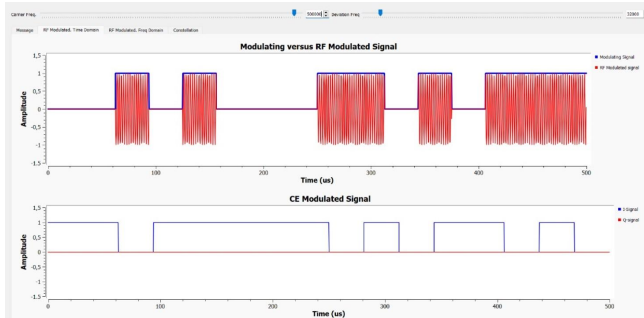


Figura 4: Señal modulada en EC y RF con una frecuencia portadora de 500 kHz, representada en el dominio del tiempo.

Cambio en frecuencia portadora para RF Modulated en el dominio de la frecuencia: La Figura 5 presenta una señal en radiofrecuencia la cual posee una frecuencia de portadora de 500 kHz la cual se presenta en el dominio de la frecuencia.

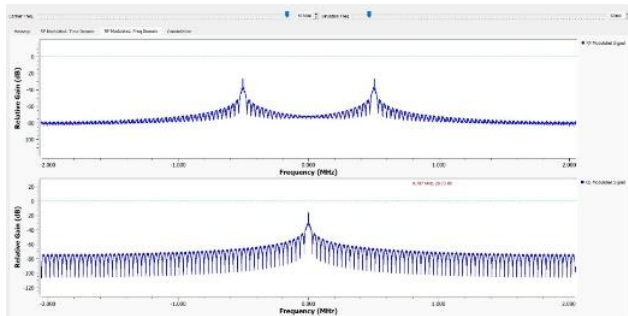


Figura 5: Espectro de la señal modulada en EC y RF con una frecuencia portadora de 500 kHz.

II-B. Análisis de los 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 funcionamiento de cada bloque (escrito en Python). Durante el análisis, se deberá explicar detalladamente su funcionamiento, destacándose mediante comentarios directamente en el código, lo cual está mostrado en las figuras 6 y 7.

```
class blk(gr.sync_block):
    """
    Este bloque corresponde a un oscilador controlado por voltaje (VCO) de radiofrecuencia
    que genera una señal sinusoidal modulada en fase, ajustando su frecuencia y fase de salida
    mediante dos entradas de tipo float32: amplitud (A) y fase (Q). La frecuencia portadora
    predeterminada (fc) es de 128 000 Hz, y opera con una frecuencia de muestreo (samp_rate)
    por defecto de 320 000 kHz. La señal de salida, también en float32, se modula dinámicamente
    según las entradas, siendo útil para pruebas de transmisión de señales moduladas o como
    referencia en sistemas de comunicación.

    Para evitar aliasing, se recomienda que la frecuencia de muestreo sea al menos el doble
    de la portadora (samp_rate >= 2*fc), y que los valores de fase (Q) se mantengan en el rango
    -pi a pi, asegurando una modulación precisa y estable.
    """
```

Figura 6: Descripción del bloque RF_VCO_ff

```
class blk(gr.sync_block):
    """
    Este bloque es un oscilador controlado por voltaje (VCO) de banda base que genera
    una señal compleja I/Q modulada en fase y amplitud. La salida, de tipo complejo, tiene
    una magnitud proporcional a la entrada de amplitud (A) y una fase ajustada por la entrada (Q),
    ambas en float32. La fase debe mantenerse en radianes dentro del rango -pi a pi para garantizar precisión.

    Es ideal para sistemas de comunicación que requieren modulación digital (como PSK o QAM),
    ya que facilita la integración con módulos que procesan señales complejas en banda base.
    Se recomienda ajustar los valores de A y Q según las necesidades específicas de la aplicación
    para optimizar su rendimiento.
    """
```

Figura 7: Descripción del bloque EC_VCO_fc

II-C. BPSK

Se configuró el flujograma según las pautas de la guía, activando bloques inicialmente inactivos y estableciendo conexiones para implementar un modulador BPSK en configuraciones de RF (radiofrecuencia) y EC (en banda base). Ante posibles fallos en la configuración inicial, se aplicó un método alternativo: redirigir la salida del bloque "Interpolating FIR Filter" y ajustar la "Constant Source" para controlar la amplitud (en lugar de la fase) de la señal, asegurando su correcto funcionamiento. Posteriormente, se ejecutaron pruebas adaptadas del punto 1 para validar el rendimiento de la modulación BPSK en distintas condiciones. 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 $f_c = 128\text{kHz}$:

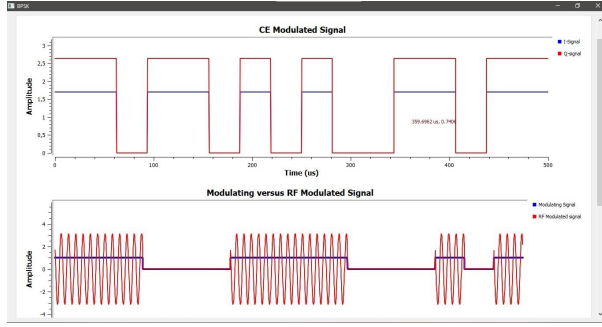


Figura 8: Señal modulada en EC y RF, con frecuencia portadora $f_c = 128$ kHz.

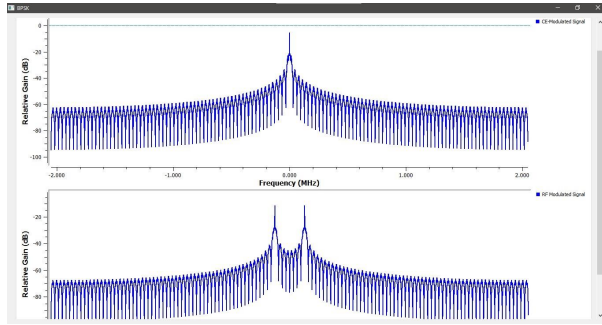


Figura 9: Señal con frecuencia portadora $f_c = 128$ kHz.

II-D. FSK

Se inició modificando el flujograma según la guía y realizando pruebas al variar la frecuencia portadora (f_c) y la desviación de frecuencia (Δf). Estas variaciones permitieron analizar el comportamiento de la señal modulada en los dominios del tiempo (ventana *Modulated-Time*) y de frecuencia (ventana *Modulated-Freq*), registrando evidencias gráficas.

Además, se configuró la señal para que los VCO (osciladores controlados por voltaje) generaran modulación FSK en sus versiones RF y envoltente compleja (EC).

Como resultado clave, se propusieron valores óptimos para f_c y Δf que minimizan el solapamiento espectral. Un ejemplo de esto se observa en las Figuras 10 y 11, donde se utilizó una frecuencia portadora de $f_c = 130$ kHz, demostrando la relación entre parámetros y la integridad de la señal modulada.

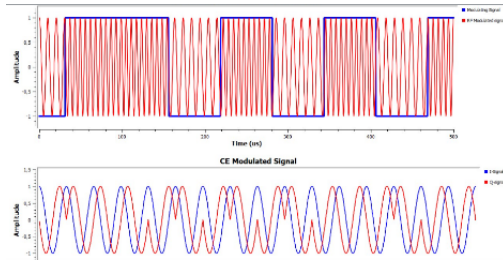


Figura 10: Señal modulada en EC y RF, con frecuencia portadora $f_c = 130$ kHz.

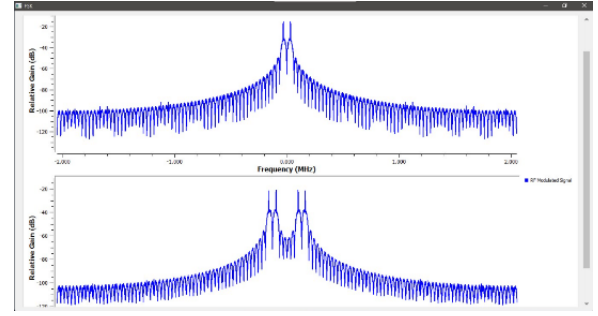


Figura 11: Espectro de la señal con frecuencia portadora $f_c = 130$ kHz.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III-A. Flujograma propuesto

Se analizó el comportamiento de señales moduladas en radiofrecuencia y su representación como envoltente compleja (EC), mediante ajustes sistemáticos de parámetros como la frecuencia portadora y la desviación de frecuencia. Se evaluó el impacto de estos cambios en los dominios temporal y espectral, identificando cómo optimizarlos para reducir solapamientos espectrales y preservar la integridad de la señal.

Los resultados destacaron la eficacia de la EC para simplificar el análisis y diseño en sistemas de comunicación digital, facilitando los procesos sin comprometer la precisión técnica.

III-B. Señales RF Y RC

El estudio evaluó señales moduladas en RF y EC, ajustando parámetros como la frecuencia portadora y la desviación para minimizar solapamientos espectrales y resaltar la utilidad de la envoltente compleja (EC) en sistemas de comunicación digital.

Al comparar las figuras, se observa que incrementar la frecuencia portadora a 500 kHz altera las señales moduladas: en la versión RF, se modifica la forma sinusoidal en el dominio temporal, mientras que en la envoltente compleja (EC), aunque no opera con portadora en banda base, su magnitud y fase reflejan las características de la modulación.

Estos cambios demuestran cómo la frecuencia portadora y el dominio de operación (RF o EC) determinan la representación de la señal, resaltando la interdependencia entre parámetros moduladores y su impacto en el comportamiento espectral y temporal.

III-C. Análisis de RF_VCO y EC_VCO

Este módulo VCO de RF genera señales sinusoidales moduladas en fase mediante entradas `float32` (amplitud `A` y fase `Q`). Opera con una frecuencia portadora de 128 kHz y una tasa de muestreo de 320 kHz, ideal para pruebas de transmisión o sistemas de comunicación. Para evitar distorsión, la tasa de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia portadora (criterio de Nyquist) y la fase (`Q`) debe mantenerse entre $[-\pi, \pi]$ para garantizar precisión.

Además, este bloque es un VCO de banda base que genera señales complejas (formato I/Q, tipo `complex64`) con modulación de fase y amplitud, controladas por entradas `float32` (`A` para la amplitud y `Q` para la fase). Diseñado para sistemas de comunicación digital (como QPSK o QAM), la amplitud de salida es proporcional a `A`, y la fase, en radianes, debe mantenerse entre $[-\pi, \pi]$ para garantizar precisión.

Ideal para la integración en sistemas de modulación en cuadratura y transmisión de datos en banda base o RF, se recomienda ajustar `A` y `Q` según los requisitos de la aplicación para optimizar su rendimiento.

III-D. Modulador BPSK

Este tipo de modulador BPSK altera la fase de una portadora de alta frecuencia (0° o 180° según el bit transmitido), ideal para transmisiones inalámbricas por su alcance físico y resistencia a interferencias. Sin embargo, su implementación exige hardware especializado debido a las altas frecuencias, lo que incrementa la complejidad técnica y los costos. Esta técnica es clave en sistemas donde la propagación en el espectro electromagnético es crítica, pero requiere componentes robustos para manejar las señales de radiofrecuencia.

Por otro lado, el modulador BPSK en Envolvente Compleja (EC) opera en banda base, evitando el uso de una portadora explícita y representando la señal mediante componentes en cuadratura (I/Q) en el dominio complejo. Este enfoque simplifica el procesamiento digital, permitiendo análisis y simulaciones mediante algoritmos, lo que reduce la dependencia de hardware especializado. Además, facilita el diseño de transmisores y receptores modernos, optimizando sistemas de comunicación digitales con mayor flexibilidad y eficiencia en aplicaciones avanzadas.

III-E. Modulador FSK

Se evaluaron dos casos: (1) variar la frecuencia portadora (f_c) manteniendo fija la desviación de frecuencia, y (2) mantener f_c constante mientras se ajustaba la desviación. En el primer caso, se observó que la separación espectral entre símbolos (para identificar cambios de bit) permanecía constante, mientras que en el segundo, esta separación aumentaba proporcionalmente al incremento de la desviación.

Tras las pruebas, se definieron los parámetros óptimos: $f_c = 50$ kHz y desviación de frecuencia de 5 kHz. Esta configuración evitó solapamientos espectrales en los picos de la señal de RF, garantizando una visualización clara de la modulación tanto en su versión de Radiofrecuencia (RF) como de Envolvente Compleja (EC), lo que asegura integridad en la representación de los símbolos y facilita su interpretación en sistemas de comunicación.

Al analizar el diagrama de constelaciones, se pudo notar que modificar la frecuencia portadora f_c no genera variaciones en el patrón de la constelación, ya que estos cambios no afectan la relación entre la fase y la frecuencia de la señal en la EC. En contraste, al ajustar la desviación de frecuencia, sí se evidencian efectos notables: al incrementarse esta desviación, aparecen nuevos puntos que representan las componentes en fase y en cuadratura de la señal.

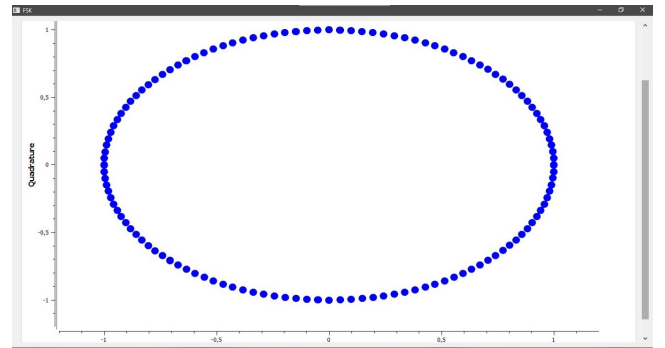


Figura 12: Diagrama de constelaciones en EC para evaluar la modulación en el plano I/Q.

IV. PREGUNTAS DE CONTROL

Las preguntas de control facilitaron una comprensión más profunda sobre la conversión de señales de radiofrecuencia (RF) a su equivalente en envolvente compleja (EC), y su vínculo con distintos esquemas de modulación digital. Uno de los aspectos más relevantes fue el parámetro *Samples Per Symbol* (SPS), cuya correcta elección es crucial para representar adecuadamente las señales moduladas. Un valor apropiado de SPS asegura un uso eficiente del ancho de banda, optimiza la relación señal-ruido y favorece una sincronización más precisa en el receptor.

Asimismo, el análisis del bloque *Multiply Const* en modulaciones como BPSK y FSK permitió identificar su función en la manipulación de parámetros como el desplazamiento de fase o la frecuencia portadora. En algunos casos específicos —por ejemplo, al asignar un valor de 1 en BPSK— este bloque podría incluso considerarse prescindible sin alterar significativamente la señal.

Durante el estudio de las modulaciones OOK, BPSK y FSK, se destacó cómo la organización y parametrización de los bloques dentro del diagrama de flujo influye directamente en el funcionamiento del sistema. En el caso de la modulación OOK, se observó que la señal modulante debe ingresar por la primera entrada del VCO, ya que controla directamente si la portadora se transmite o no. Por el contrario, en BPSK y FSK, la modulación incide sobre parámetros como la fase o la frecuencia, lo que justifica su conexión por la segunda entrada del VCO. También se discutió la posibilidad de reubicar el filtro FIR interpolador antes del VCO en estas últimas modulaciones. Aunque técnicamente viable, dicha modificación requiere una evaluación cuidadosa para evitar distorsiones no deseadas y asegurar que el esquema de modulación siga cumpliendo con sus objetivos.

Por último, se abordaron los límites teóricos y prácticos de los parámetros de modulación, como el valor máximo admisible de la frecuencia portadora en FSK. A través del teorema de Nyquist, se estableció que la frecuencia de muestreo debe ser lo suficientemente alta para prevenir el *aliasing* y conservar la fidelidad de la señal en el dominio de RF. De igual forma, se examinó el valor mínimo de SPS necesario para obtener una representación adecuada en RF de modulaciones como BPSK, teniendo en cuenta la velocidad de transmisión de datos, la tasa de muestreo y los requerimientos del filtrado.

V. CONCLUSIONES

- La comparación entre las señales moduladas en radiofrecuencia (RF) y su representación en envolvente compleja (EC) permitió entender cómo el comportamiento de la señal cambia al modificar la frecuencia portadora y cómo responde frente a los datos binarios. En los dominios del tiempo y frecuencia, se evidenció que las componentes I/Q reflejan directamente las propiedades de la modulación.
- La representación mediante EC simplifica tanto el análisis como el diseño de sistemas de modulación digital, permitiendo una detección, filtrado y recuperación de información más eficientes. Al operar en banda base, evita el uso de altas frecuencias, optimizando recursos de procesamiento.
- Mientras en RF la señal requiere una portadora explícita, en EC la modulación se representa directamente mediante componentes en fase y cuadratura (I/Q). Cambios como la frecuencia portadora o la desviación afectan de forma distinta la señal según el dominio analizado.
- El análisis del diagrama de constelaciones mostró que variaciones en la frecuencia portadora no modifican su patrón en EC, dado que la relación fase-frecuencia se mantiene. En cambio, al aumentar la desviación de frecuencia, emergen nuevos puntos en la constelación, indicando alteraciones en las componentes I/Q de la señal modulada.
- La modulación FSK en RF demostró ser adecuada para entornos con interferencia o desvanecimiento, gracias a su capacidad de separar canales con claridad. Por su parte, su representación en EC facilita el diseño, modelado y análisis de sistemas digitales mediante simulación en software, reduciendo la necesidad de hardware especializado.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Moreno, D. F. Orduz, y Á. R. Castro, "Repositorio LAB_COMU2_G7 - Práctica 3," [En línea]. Disponible en: https://github.com/DanielO1006/LAB_COMU2_G7/tree/Practica_3
- [2] O. J. Tijero, "4 Complex Envelope of a Bandpass Signal," [En línea]. Disponible en: <https://lms.uis.edu.co/ava/mod/resource/view.php?id=12961>
- [3] O. J. Tijero, "5 OOK, BPSK and FSK," [En línea]. Disponible en: <https://lms.uis.edu.co/ava/mod/resource/view.php?id=12962>