

## Práctica 3: DE RADIOFRECUENCIA A LA ENVOLVENTE COMPLEJA

JUAN DIEGO PEÑA SALINAS - 2195587  
MILLER STEVEN GAMBA ARIZA - 2195584

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

4 de octubre de 2023

### RESUMEN

En la práctica de laboratorio se realizó un análisis profundo de la envolvente compleja. Lo eficiente que es modular, demodular, analizar y procesar una señal en su envolvente compleja. Con el software GNURADIO y diferentes combinaciones de bloques exploramos el uso de la envolvente compleja.

**Palabras clave:** envolvente compleja, modulación digital, radiofrecuencia, banda base.

### 1. INTRODUCCIÓN

La envolvente compleja de una señal se destaca como una herramienta altamente efectiva y útil que nos brinda una representación detallada de la señal en términos de su amplitud y fase en relación con el tiempo. A diferencia del dominio del tiempo, la envolvente compleja posibilita la descomposición de la señal en sus componentes de amplitud instantánea y frecuencia instantánea, los cuales son expresados mediante números complejos. De esta manera, no solo obtenemos información acerca de cómo varía la amplitud de la señal a lo largo del tiempo, sino también acerca de las variaciones en su fase y frecuencia en cada instante [1].

$$x(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \phi(t))$$

$$x(t) \xleftrightarrow{RF-EC} S_{EC}(t) = A(t)e^{j\phi(t)}$$

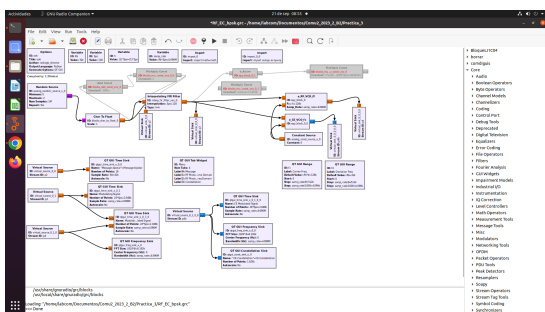
Una de las características clave de la envolvente compleja es su naturaleza no lineal; esto significa que no podemos simplemente sumar las componentes lineales de la señal para obtenerla. En cambio, la envolvente compleja se calcula mediante técnicas como la transformada de Hilbert, que capturan la información no lineal de la señal. Esto es esencial en aplicaciones donde la amplitud, la fase y la frecuencia de la señal pueden cambiar significativamente, como en la modulación de amplitud o en señales con contenido armónico variable.

Además, la envolvente compleja es una función dependiente del tiempo. Esto significa que no es una característica estática de la señal, sino que evoluciona a medida que la señal cambia con el tiempo. Esta dinámica es particularmente valiosa en el análisis de señales no estacionarias, donde las propiedades de la señal pueden cambiar de un momento a otro.

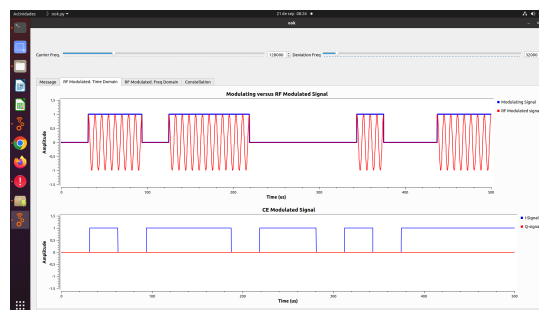
En cuanto a sus aplicaciones, la envolvente compleja se utiliza en una amplia variedad de campos. En comunicaciones, es esencial para la demodulación de señales AM y FM. En procesamiento de audio y video, ayuda a extraer características importantes de las señales. En aplicaciones de radar y sonar, permite detectar objetos y rastrear su movimiento. En medicina, se utiliza para analizar señales biomédicas como el ECG. Además, en la ingeniería, la envolvente compleja se convierte en una herramienta importante para evaluar la salud de maquinaria, identificando picos de amplitud que indican problemas potenciales en equipos industriales [2].

## 2. PROCEDIMIENTO

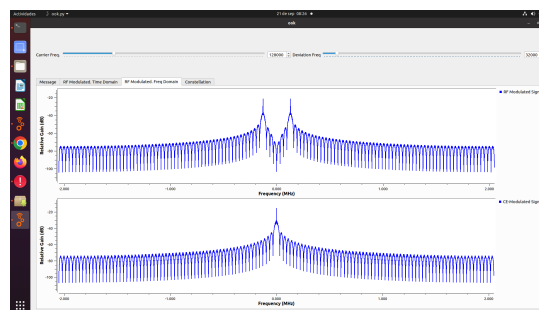
**2.1** Para comenzar este laboratorio, descargamos el archivo RF\_EC\_ook.grc (Figura 1), proporcionado por el profesor, y lo ejecutamos sin realizar modificaciones para observar la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia. Además, llevamos a cabo variaciones en la frecuencia de la portadora y examinamos las consecuencias de realizar estos cambios.



**Figura 1.** Esquema en GNUradio del archivo RF\_EC\_ook.grc.



**Figura 2.** Señales moduladas para OOK en el dominio del tiempo.



**Figura 3.** Señales moduladas para OOK el dominio de la frecuencia.

Al variar aleatoriamente la frecuencia de la portadora ( $F_c$ ), la primera observación destacada es que cuando la señal modulada tiene un valor de 1, la señal RF se distingue de cero, presentando una forma sinusoidal. Por el contrario, cuando la señal modulada es igual a cero, el valor de RF también se mantiene en cero. Teniendo esto en mente, podemos analizar que al aumentar la frecuencia de la portadora, simplemente se incrementa la frecuencia de RF en los intervalos donde la señal modulada es igual a 1, en el dominio del tiempo.

En cuanto a la señal EC, debido a que no contiene una señal de portadora, las variaciones que efectuamos en  $F_c$  no afectan en absoluto a la señal EC en el dominio del tiempo.

Por lo tanto, la primera diferencia notable entre la señal RF y la señal EC es que RF contiene una portadora y, como resultado, se comporta como una señal de paso de banda.

Por otro lado, la señal EC se comporta como una señal de banda base debido a la ausencia de una portadora, y además, es una señal polar, oscilando entre 0 y 1. Esto indica claramente que no hay una componente en cuadratura presente en la señal EC.

SEÑAL RF	SEÑAL EC
Contiene una señal de portadora	No contiene señal de portadora
Comportamiento de paso de banda	Comportamiento de banda base
Variaciones en Fc afectan la frecuencia de RF cuando la señal modulada es igual a 1	Variaciones en Fc no afectan la señal EC en el dominio del tiempo
Oscila entre 0 y 1 (señal polar)	Oscila entre 0 y 1 (señal polar)
No hay componente en cuadratura presente	No hay componente en cuadratura presente

**Tabla 1.** Análisis de resultados de la parte 2.1.

**2.2** En el esquema descargado, se pueden identificar dos bloques: e\_RF\_VCO y e\_EC\_VCO. El siguiente paso consistió en comprender el funcionamiento de estos bloques y elaborar una descripción en el código para que el usuario pueda entender las capacidades y funciones de cada uno de ellos.

```

1 import numpy as np
2 from gnuradio import gr
3 import math
4
5 class blk(gr.sync_block):
6     """This block is a RF VCO and works as following: ..."""
7
8     def __init__(self, fc=128000, samp_rate=320000):
9         gr.sync_block.__init__(
10             self,
11             name='e RF VCO ff',
12             in_sig=[np.float32, np.float32],
13             out_sig=[np.float32]
14         )
15         self.fc = fc
16         self.samp_rate = samp_rate
17         self.n_m=0
18
19     def work(self, input_items, output_items):
20         A=input_items[0]
21         Q=input_items[1]
22         y=output_items[0]
23         N=len(A)
24         n=np.linspace(self.n_m,self.n_m+N-1,N)
25         self.n_m += N
26         y[:]=A*np.cos(2*math.pi*self.fc*n/self.samp_rate+Q)
27         return len(output_items[0])
28
29

```

**Figura 4.** Código Python respectivo del bloque RF.

Descripción del bloque : “In the first part, we declare the carrier frequency and the sampling frequency. In the second part, we define the input and output values. The output is the product of multiplying the first input value by a cosine whose frequency is determined by the first parameters fc, and a vector of successive numbers from 0 to the length of the input vector.”

```

1 import numpy as np
2 from gnuradio import gr
3 import math
4
5 class blk(gr.sync_block):
6     """This block is a CE VCO or baseband VCO and works as following: ..."""
7
8     def __init__(self):
9         gr.sync_block.__init__(
10             self,
11             name='e CE VCO fc',
12             in_sig=[np.float32, np.float32],
13             out_sig=[np.complex64]
14         )
15
16     def work(self, input_items, output_items):
17         A=input_items[0]
18         Q=input_items[1]
19         y=output_items[0]
20         N=len(A)
21         y[:]=A*np.exp(1j*Q)
22         return len(output_items[0])
23
24

```

**Figura 5.** Código Python respectivo del bloque EC.

Descripción del bloque: “In the first part, we declare the carrier frequency and the sampling frequency. In the second part, we declare the input values, and the output is the product of the first input value multiplied by Euler's number raised to our second complex input, representing the imaginary part.”

**2.3** En esta sección, se trabajó con señales moduladas tipo BPSK, lo que implicó realizar modificaciones en el flujo de trabajo original mostrado en la Figura 1. Estas modificaciones se pueden visualizar en la Figura 6.

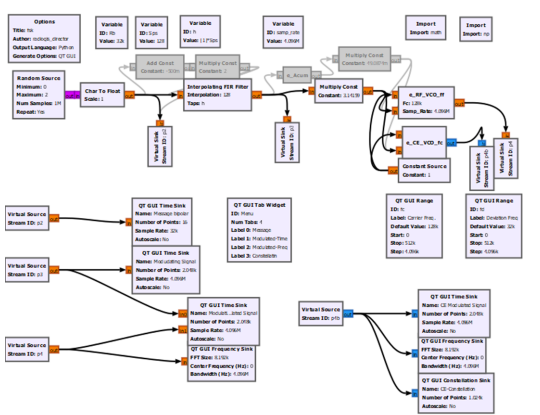


Figura 6. Flujoograma para una modulación BPSK.

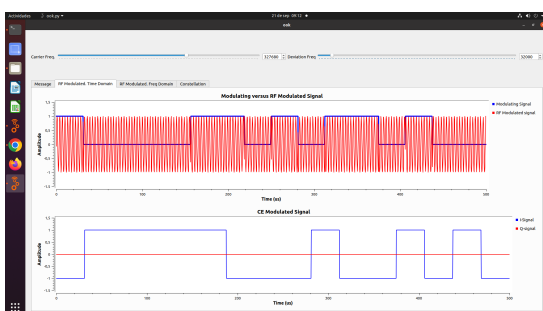


Figura 7. Señales moduladas para BPSK en el dominio del tiempo.

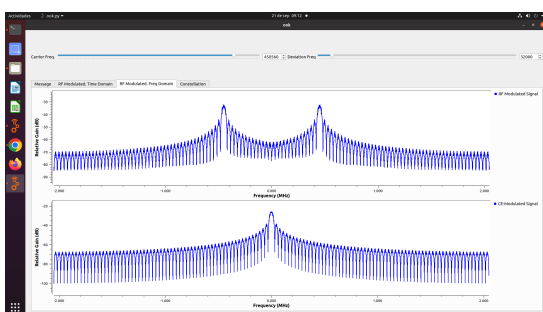


Figura 8. Señales moduladas para BPSK en el dominio de la frecuencia.

La modulación BPSK, que significa 'Binary Phase Shift Keying' (Modulación por Desplazamiento de Fase Binario), efectivamente altera la fase de la señal. En el contexto de la señal RF, cuando hay un cambio en la señal modulada, la fase se invierte, pasando de  $180^\circ$  a  $-180^\circ$ . Por otro lado, en el

caso de la señal EC, esta ya no varía de 0 a 1, sino que oscila entre 1 y -1.

2.4 En este punto, fue necesario basarnos en el procedimiento realizado en la sección 2.3, ya que teníamos que modular las señales en FSK y analizar su comportamiento en el dominio del tiempo.

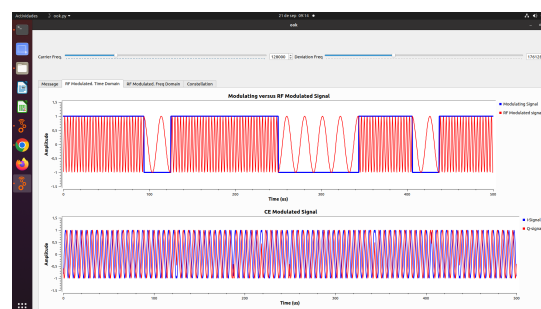


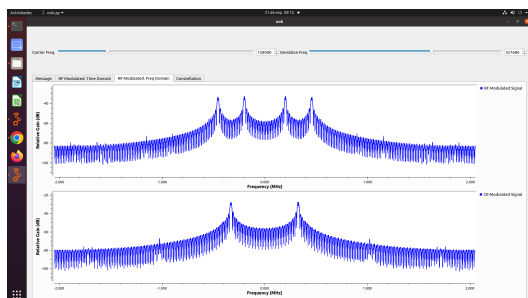
Figura 9. Señales moduladas para FSK en el dominio del tiempo.

La señal FSK puede interpretarse como la combinación de dos señales OOK, cada una con una frecuencia diferente, lo que resulta en una señal que alterna entre dos frecuencias,  $f_0$  y  $f_1$ . En el contexto de RF, cuando se produce un cambio a 1, la frecuencia disminuye, y cuando cambia a -1, la frecuencia aumenta. Por otro lado, en la envolvente compleja, la señal consta de una parte real y una parte imaginaria. Mientras se mantiene la desviación de frecuencia constante, la parte real de la señal permanece continua, mientras que la parte imaginaria experimenta cambios en su fase cuando ocurre una transición de símbolo.

TIPO DE SEÑAL	COMPORTAMIENTO EN FSK
Señal RF	Cambia de frecuencia en 1 y -1
Señal EC	Parte real continua, parte imaginaria cambia fase en cambio de símbolo

Tabla 2. Análisis de resultados de la parte 2.4.

## 2.5 Modulación FSK en el dominio de la frecuencia.



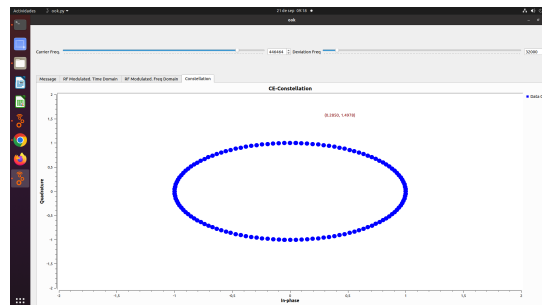
**Figura 10.** Señales moduladas para FSK en el dominio de la frecuencia.

En el espectro de la señal, es evidente que al variar la frecuencia de la portadora mientras se mantiene constante la desviación de frecuencia, el espectro de RF se aleja o se acerca al origen, enfocándose en la frecuencia de la portadora. Por otro lado, en el caso de EC, el espectro siempre se centra en cero, independientemente del valor de la frecuencia. Cuando se altera el valor de la desviación de frecuencia mientras se mantiene constante la frecuencia de la portadora, se observa que a medida que la desviación aumenta, la separación entre las frecuencias de la señal también aumenta.

TIPO DE SEÑAL	VARIAR FC	VARIAR FD
RF	Centrada en FC.	Aumenta la separación entre pulsos.
EC	Centrada en 0.	Aumenta la separación entre pulsos.

**Tabla 3.** Análisis de resultados de la parte 2.5.

## 2.6 Modulación FSK en la constelación.



**Figura 11.** Señales moduladas para FSK, diagrama de constelación.

Se pudo observar que, al mantener constante la desviación de frecuencia y variar la frecuencia de la portadora, el diagrama de constelación no experimenta cambios significativos. En contraste, cuando se altera la desviación de frecuencia mientras se mantiene constante la frecuencia de la portadora, se observan cambios notables en la cantidad de muestras por ciclo en el diagrama de constelación.

FRECUENCIA PORTADORA	DESVIACIÓN DE FRECUENCIA	COMPORTAMIENTO, DIAGRAMA DE CONSTELACIÓN
Constante	Variada	Cambios en la cantidad de muestras por ciclo
Variada	Constante	No se presentan cambios notables

**Tabla 4.** Análisis de resultados de la parte 2.6.

## 3. PREGUNTAS



**3.1** Preguntas de auto control sobre el flujograma RF\_EC\_xxx.grc:

**3.1.1** Generar la versión pasa-bandas (señal RF) de una modulación nos ha obligado a usar un valor muy alto para Sps. ¿Cómo podríamos saber que el valor elegido es apropiado o suficientemente alto?

**R** Ya que con este valor estamos definiendo nuestro Samp Rate.

**3.1.2** ¿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?

**R** Sí es lo mismo que quitarlo porque al multiplicarlo por 1 estamos diciendo que se multiplica por el mismo valor que viene.

**3.1.4** ¿Por qué el bloque “Constant Source” se configura como cero para la modulación OOK pero no para la BPSK y la FSK?

**R** La señal OOK, al ser una modulación de amplitud, se enciende o apaga en función de los símbolos binarios que transmite. Configurar el bloque 'Constant Source' en cero permite mostrar una fuente constante cuando su valor digital es cero. En cambio, en las modulaciones BPSK y FSK, donde se produce una transición binaria de 1 a 0 y la portadora se utiliza para representar diferentes fases o frecuencias, no es posible establecer el bloque 'Constant Source' en cero.

**3.1.5** ¿Por qué razón en el caso de la Modulación OOK la señal modulante entra por la primera entrada (la superior) de los VCO a diferencia de la BPSK y FSK que entra por la segunda entrada (la inferior) de los VCO?

**R** Porque la modulación OOK es diferente el tratamiento ya que aquí la amplitud de la señal modulada depende de la señal de salida del bloque “Interpolating FIR Filter”.

**3.1.6** Para el caso de la Modulación BPSK, sería posible reubicar el bloque “Interpolating FIR

Filter” para que quede inmediatamente antes de los VCO”

**R** No sería posible ya que el bloque después del bloque “Interpolating FIR Filter” se multiplica, al colocar el bloque antes de VCO tendríamos el valor de la modulación mayor respecto al original.

**3.1.7** Para el caso de la Modulación FSK, sería posible reubicar el bloque “Interpolating FIR Filter” para que quede inmediatamente antes de los VCO”

**R** No sería posible ya que lo que está antes del bloque VCO depende directamente del bloque “Interpolating FIR Filter”.

#### 4. CONCLUSIONES

- Es importante tener claro el concepto de la envolvente compleja ya que es ampliamente utilizada en distintos campos, como las comunicaciones, el procesamiento de audio y video, el radar, el sonar, la medicina y el análisis de maquinaria. Su flexibilidad la convierte en una herramienta valiosa para una amplia gama de aplicaciones técnicas y científicas.
- La envolvente compleja es una representación de una señal que proporciona información sobre su amplitud y fase en un instante dado. Esta información es esencial para comprender cómo cambia la señal en el tiempo, tanto en su forma como en su posición.
- La envolvente compleja es una función que no puede obtenerse mediante la suma de componentes lineales de la señal. Esto se debe a que es una función no lineal y dependiente del tiempo. La naturaleza no lineal de la envolvente compleja es esencial para capturar las variaciones complejas en la amplitud, la fase y la frecuencia de la señal a lo largo del tiempo.
- La envolvente compleja es una herramienta valiosa para el análisis de señales no estacionarias, ya que puede proporcionar

información sobre las variaciones de la señal con el tiempo. Esto permite detectar eventos de interés, como picos, valles o cambios de fase.

#### REFERENCIAS

[1] TOMASI, Wayne. *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, 2003.

[2] “Análisis de un sistema de comunicaciones afectado por los desvanecimientos plano y lento tipo Rayleigh” [Online].

Aviable:

<http://www.scielo.org.co/pdf/inun/v12n1/v12n1a02.pdf>

LINK GitHub;

[https://github.com/Juandieg19/Comu2\\_2023\\_2/tree/Practica\\_3](https://github.com/Juandieg19/Comu2_2023_2/tree/Practica_3)