

## Práctica 2: PSD DE SEÑALES ALEATORIAS (GNURADIO)

Anderson David Hernandez Rodriguez - 2202930  
Karen Daniela Rangel Uribe - 2191709  
Sharon Catalina Vargas Cortes - 2211259

<https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2<sub>B1G2</sub>>

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

18 de marzo 2025

### Resumen

This report documents the analysis of Power Spectral Density (PSD) on random signals using GNURadio. Through various tests and configurations, the spectral distribution of random binary signals, white noise, and signals from real-world sources such as images and audio is studied. Computational tools are employed in a Linux environment, using GitHub for version control and collaboration. The results obtained provide a better understanding of the spectral behavior of different types of signals and their impact on telecommunications applications.

## 1. Introducción

El análisis espectral de señales aleatorias es un aspecto clave en el procesamiento de señales y las telecomunicaciones. La PSD permite evaluar la distribución de la energía de una señal en función de la frecuencia, lo que resulta fundamental para diseñar y optimizar sistemas de comunicación. En esta práctica, se emplea GNURadio para la implementación y análisis de señales binarias, ruido blanco y señales obtenidas de fuentes del mundo real, con el objetivo de explorar su comportamiento en el dominio de la frecuencia. A lo largo del informe, se detallan los procedimientos empleados, los resultados obtenidos y su relevancia en el estudio de señales.[1]

## 2. Metodología

El desarrollo de la práctica sigue un enfoque experimental basado en la implementación de bloques de GNURadio para la generación y análisis de señales. Primero, se configura el entorno de trabajo en Linux y se gestiona el código mediante GitHub. Luego, se diseñan y ejecutan

flujogramas que permiten observar la PSD de señales binarias aleatorias con diferentes valores de Sps. Posteriormente, se analiza la PSD del ruido blanco y se estudian señales provenientes de fuentes reales como imágenes y audio, comparando sus características espectrales. Finalmente, se responden preguntas de control que refuerzan los conceptos aprendidos a lo largo del experimento.

### 2.1. Señal binaria aleatoria

En la primera parte del experimento, se generó una señal binaria aleatoria bipolar de forma rectangular mediante el flujograma `randbinaayrectsignal.grc` y se analizaron sus características en el dominio del tiempo y la frecuencia, observando su comportamiento y estructura espectral. Para obtener la Densidad Espectral de Potencia (PSD), se variaron los valores de Sps (Samples per Symbol) con configuraciones de 4, 8, 16 y 1, registrando las diferencias en cada caso.

### 2.2. Ruido Blanco

Se estudio el ruido blanco en términos de su representación en el dominio temporal y su correspondiente PSD, configurando las fuentes virtuales en GNU Radio, asegurando que los bloques de referencia tuvieran las etiquetas `p4` y `p5`. Se realizaron múltiples pruebas con diferentes configuraciones, observando y documentando los cambios en la señal.

### 2.3. Señales provenientes de fuentes del mundo real

Se modificó el flujograma original, incorporando una fuente de datos proveniente de una imagen (`rana.jpg`).

Esto permitió la conversión de los píxeles en una señal binaria que fue analizada en el dominio del tiempo y en el espectro de frecuencia. Se repitió el experimento utilizando una fuente de audio (sonido.wav), con el propósito de comparar los resultados con los obtenidos a partir de la imagen. En cada caso, se documentaron las diferencias en la PSD y se discutieron las implicaciones del origen de la señal en su representación espectral.

## 2.4. Modificaciones en la señal

Se estudió el bloque Interpolation FIR Filter en la transformación de la señal y su interpolación. Se analizaron distintas estrategias de modulación y codificación de señales, incluyendo Manchester NRZ, Unipolar RZ, OOK, BPSK y ASK, para determinar sus efectos en la representación espectral. Luego, se realizó un análisis comparativo entre señales binarias bipolares y unipolares, observando sus respectivas densidades espectrales y las diferencias en su ancho de banda y distribución de energía.

## 3. Resultados

### 3.1. Señal binaria aleatoria

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para una señal binaria aleatoria bipolar con diferentes valores de SPS (muestras por símbolo). Se muestran la forma en el tiempo, la Densidad Espectral de Potencia (PSD) y los parámetros principales de cada caso.

Los parámetros principales analizados son:

- **Rata de bits ( $R_b$ ):** Velocidad de transmisión de datos en bits por segundo.
- **Frecuencia de muestreo ( $f_s$ ):** Número de muestras por segundo utilizadas en el análisis.
- **Ancho de banda ( $BW$ ):** Extensión en frecuencia donde la señal tiene presencia espectral significativa.

#### 3.1.1. SPS = 1

- **Parámetros principales:**
  - $R_b$  = (Valor calculado)
  - $f_s$  = (Valor calculado)
  - $BW$  = (Valor calculado)

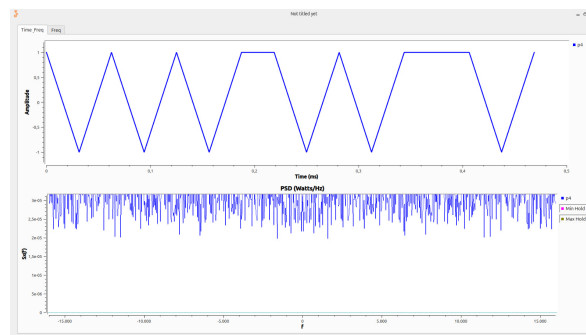


figura 1. Forma en el tiempo y PSD de un señal binaria aleatoria con PSP = 1.

#### 3.1.2. SPS = 4

##### ■ Parámetros principales:

- $R_b$  = (Valor calculado)
- $f_s$  = (Valor calculado)
- $BW$  = (Valor calculado)

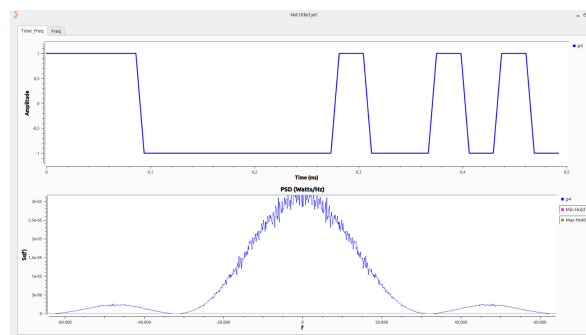


figura 2. Forma en el tiempo y PSD de un señal binaria aleatoria con PSP = 4.

#### 3.1.3. SPS = 8

##### ■ Parámetros principales:

- $R_b$  = (Valor calculado)
- $f_s$  = (Valor calculado)
- $BW$  = (Valor calculado)

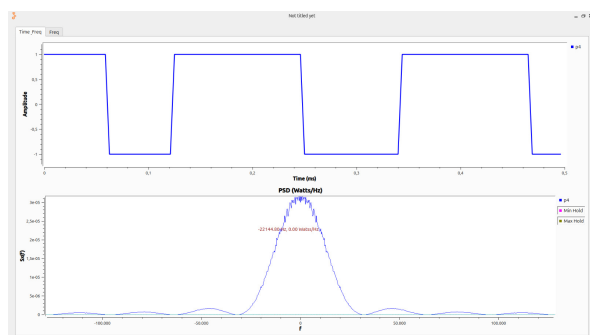


figura 2. Forma en el tiempo y PSD de un señal binaria aleatoria con PSP = 8.

### 3.1.4. SPS = 16

#### ■ Parámetros principales:

- $R_b$  = (Valor calculado)
- $f_s$  = (Valor calculado)
- $BW$  = (Valor calculado)

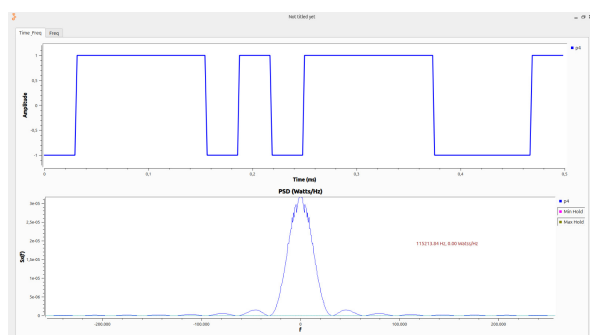


figura 4. Forma en el tiempo y PSD de un señal binaria aleatoria con PSP = 16.

### 3.2. Ruido blanco

El ruido blanco tiene un espectro plano, lo que significa que su densidad espectral de potencia (PSD) es constante en todas las frecuencias:

$$S_x(f) = \frac{N_0}{2} \quad (1)$$

En la figura 5, se observa una señal de ruido en el dominio del tiempo, la amplitud de la señal fluctúa de manera aleatoria, lo que es característico del ruido blanco y la forma de la onda no tiene periodicidad clara, lo que indica que el contenido frecuencial está distribuido de manera uniforme.

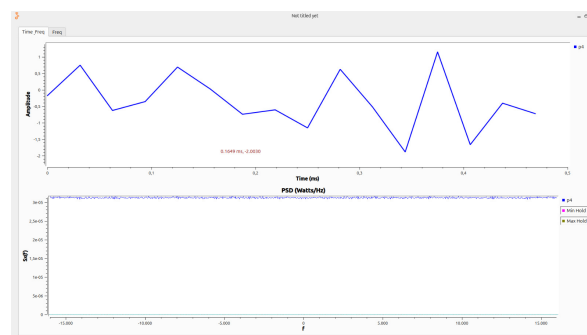


Figura 5. señal de ruido blanco - prueba 1

En la figura 6, se realizó una segunda prueba con SPS = 4, lo que significa que hay más puntos por ciclo en la señal de tiempo. La PSD se mantiene plana ya que sigue manteniendo la característica de ruido blanco y también se nota una mayor cantidad de ruido en la señal, lo que se refleja en un espectro con una mayor dispersión en frecuencia ya que al ser muestreada con un mayor número de muestras por símbolo (SPS) captura más detalles del ruido.

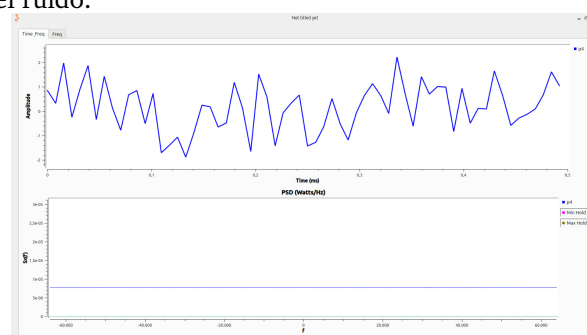


Figura 6. señal de ruido blanco - prueba 2 - sps=4

### 3.3. Bits provienen de una cámara fotográfica.

En este experimento, se reemplazó la fuente aleatoria de bits por una fuente del mundo real, utilizando una imagen como entrada. Para ello, se configuró el bloque "File Source" para leer el archivo rana.jpg y se extrajeron los bits correspondientes. Posteriormente, se analizaron las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia mediante la estimación de la densidad espectral de potencia (PSD). Se observó que, a diferencia de una secuencia aleatoria, los datos provenientes de la imagen presentan una distribución espectral con características específicas, reflejando patrones de correlación inherentes a la estructura de la imagen. Estas diferencias son evidentes en las gráficas obtenidas, permitiendo inferir la influencia de la

fuelle de datos en la señal procesada.



figura 7 .Rana.

La figura 8 muestra la distribución de la energía de la señal en el dominio de la frecuencia. Se puede notar una banda principal de energía con lóbulos secundarios, característicos de señales con transiciones abruptas en el tiempo. La PSD permite analizar el ancho de banda y la presencia de componentes de frecuencia que pueden influir en la transmisión y procesamiento de la señal.

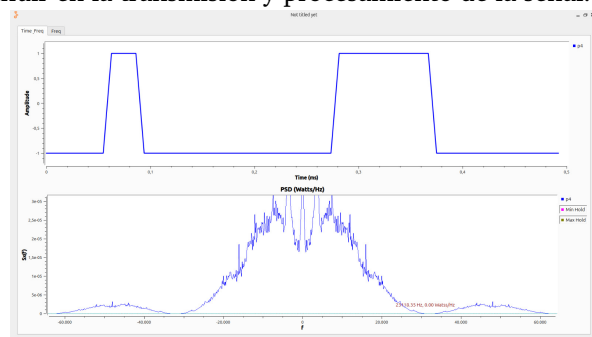


figura 8 .Señal en el tiempo y PSD de la Rana.

### 3.4. Bits provienen de un micrófono.

En este experimento, se reemplazó la fuente de bits por una señal de audio real proveniente de un archivo sonido.wav. Se configuró el bloque "File Source" para leer el archivo y extraer los datos correspondientes.

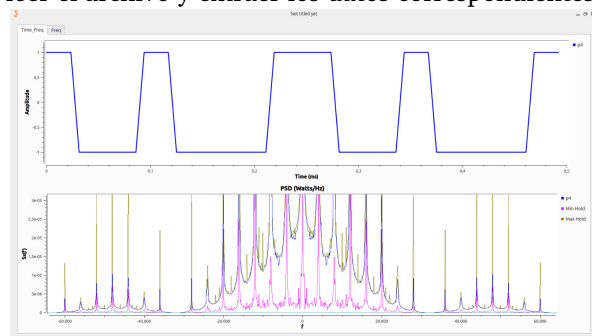


figura 9 .Señal en el tiempo y PSD de un audio real.

Se aprecia un espectro con picos bien definidos, indicando la presencia de componentes armónicos fuertes. Esto es característico de señales provenientes de fuentes con periodicidad o patrones estructurados, como el habla o sonidos musicales. La distribución de la potencia

en el dominio de la frecuencia difiere significativamente de la obtenida con datos aleatorios o imágenes, lo que demuestra la influencia del tipo de fuente en el comportamiento espectral.

### 3.5. Preguntas de control.

La combinación de bloques en GNU Radio permite la generación de una señal binaria aleatoria, su conversión a una forma bipolar y el procesamiento necesario para obtener su PSD. Dependiendo de la configuración, estos bloques pueden realizar interpolaciones, filtrado y análisis espectral.

El Interpolation FIR Filter es un filtro que permite aumentar la tasa de muestreo de la señal al insertar muestras intermedias calculadas a partir de un filtro de respuesta finita (FIR). Funciona aplicando una interpolación para suavizar la transición entre muestras originales y mejorar la resolución espectral de la señal.

El parámetro Interpolation se establece en SPS (Samples per Symbol) porque determina cuántas muestras representarán cada símbolo en la señal. Si se cambia este valor, la señal puede volverse más densa en muestras (mayor interpolación) o más dispersa (menor interpolación), afectando su ancho de banda y la fidelidad de la reconstrucción temporal.

La señal en p3, es la que proviene de la fuente aleatoria sin hacerle ningún tipo de filtrado o de modificación en su tasa de muestreo, por ende, solo sería necesario cambiar el valor de p4 a p3 de la virtual source a la que se le analiza su comportamiento en tiempo y en frecuencia.

Con el teorema de muestreo de Nyquist ( $f_s \geq 2B$ ), definiendo la frecuencia máxima de la señal como el ancho de banda límite y sabiendo la frecuencia de muestreo que se emplea en el esquema de GNU-Radio ( $R_b Sps$ ), el ancho de banda se puede calcular como

$$B = \frac{R_b Sps}{2}$$

La frecuencia de muestreo de la señal p4, está dada por los Sps, ya que se emplea para agregarle muestras a la señal aleatoria y aumentar la tasa de muestreo. Debido a esto, se puede decir que

$$f_{sp3} = \frac{f_{sp4}}{Sps}$$

El bloque Throttle en GNU Radio regula la velocidad de procesamiento de la señal en sistemas sin hardware SDR, evitando un uso excesivo de la CPU. Esto es útil cuando se trabaja solo en simulación para que el sistema funcione de manera estable.

Si la señal es unipolar (0 y 1) en lugar de bipolar (-1 y 1), la PSD tendrá una componente de frecuencia en DC (0 Hz) significativa. Esto sucede porque una señal unipolar tiene un valor medio distinto de cero, lo que genera una concentración de energía en bajas frecuencias.

En GNU Radio no se observa un ancho de banda infinito porque en la implementación digital se trabaja con una frecuencia de muestreo finita, lo que limita el espectro observable. Además, la PSD del ruido blanco en la práctica tiene un ancho de banda restringido por filtros y la tasa de muestreo aplicada.

En teoría, una señal binaria rectangular tiene un espectro de ancho de banda infinito debido a sus transiciones abruptas, que contienen altas frecuencias. Sin embargo, en GNU Radio, el espectro observado está limitado por la frecuencia de muestreo y los filtros implementados, lo que restringe su ancho de banda efectivo. El número de lóbulos visibles en la PSD se puede aproximar por:

$$N = \frac{Fs}{Rb}$$

El rango de frecuencias ocupado se puede calcular como:

$$BW = Rb \cdot Sps$$

donde Rb es la tasa de bits y Sps es el número de muestras por símbolo.

La resolución espectral ( $\Delta f$ ) se obtiene mediante:

$$\Delta f = \frac{Fs}{N}$$

donde Fs es la frecuencia de muestreo y N es el número de puntos de la FFT.

Si K = 16, cada muestra contendría 16 bits de información, lo que aumentaría la cantidad de datos por muestra. Esto afectaría la forma de la señal y podría cambiar la resolución espectral observada en la PSD.

Para cada caso de codificación (Manchester NRZ, Unipolar RZ, OOK, BPSK, ASK, etc.), se modificaría la interpolación y los coeficientes del FIR Interpolating Filter para darle a la señal la forma deseada. Por ejemplo:

Manchester NRZ: Se debe introducir una transición en la mitad del símbolo. Unipolar RZ: Se introduce un retorno a cero en cada bit. OOK: Se mantiene el valor cuando hay un '1' y se coloca un cero cuando hay un '0'. BPSK: Se introduce una inversión de fase dependiendo del bit transmitido.

Finalmente, para comparar la PSD de una señal binaria bipolar y una unipolar, se deben observar las diferencias en la distribución espectral, destacando que la unipolar tendrá una componente de DC, mientras que la bipolar tendrá una distribución más balanceada en frecuencia.

Finalmente, para comparar la PSD de una señal binaria bipolar y una unipolar, se deben observar las diferencias en la distribución espectral, destacando que la unipolar tendrá una componente de DC, mientras que la bipolar tendrá una distribución más balanceada en frecuencia.

## 4. Conclusiones

- La PSD es una herramienta clave para analizar cómo se distribuye la energía de una señal en el dominio de la frecuencia. Esto permite caracterizar señales aleatorias y evaluar su comportamiento en sistemas de comunicación.
- La práctica demuestra cómo la variación de parámetros como la tasa de bits y la frecuencia de muestreo afecta la forma en el tiempo y la PSD de una señal binaria aleatoria. A medida que se incrementa el número de muestras por símbolo (Sps), se pueden observar cambios en el ancho de banda y en la resolución espectral.
- Se evidencia que el ruido blanco tiene una distribución espectral teóricamente infinita, pero en la práctica su ancho de banda es limitado por la instrumentación utilizada. Esto es relevante para el diseño de sistemas que buscan minimizar la interferencia y optimizar la transmisión de información.
- El laboratorio permite experimentar con distintas formas de codificación, como Manchester, Unipolar RZ y modulaciones como BPSK y OOK. Esto refuerza la comprensión de cómo las técnicas de transmisión afectan la ocupación del espectro y la eficiencia del canal.

## Referencias

- [1] Hsu, Hwei P., "Densidad Espectral de Potencia y señales aleatorias en sistemas lineales," 2025, [Accedido: 18-mar-2025]. [Online]. Available: [https://highered.mheducation.com/sites/dl/free/6071509211/976370/Maq\\_Cap\\_9\\_HSU.pdf](https://highered.mheducation.com/sites/dl/free/6071509211/976370/Maq_Cap_9_HSU.pdf)