

Práctica II: PSD de señales aleatorias y modulaciones digitales

Samantha Lucía Triana Toloza - 2212249

Jose Alejandro Barrios Pico - 2212278

Repositorio: https://github.com/Josebarr20/CommII_G6_JBST/tree/Practica_2

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

20 de septiembre de 2025

Abstract

The purpose of the practical exercise was to internalize the concepts of random signals and their spectral analysis using Power Spectral Density (PSD). Initially, the students worked with rectangular bipolar random binary signals, evaluating their time and frequency characteristics under different oversampling (PSD) conditions. Subsequently, the behavior of white noise and its PSD were analyzed, comparing the results with theory. Signals from real sources, such as an image (rana.jpg) and an audio file (sound.wav), were also analyzed, comparing the differences in PSD according to the nature of the data. Finally, control questions were answered to consolidate theoretical and practical concepts, including aspects such as determining bandwidth, sampling frequency, spectral resolution, and variations in signal shape according to different digital modulation schemes (OOK, BPSK, ASK, among others). In short, the practice allowed us to strengthen the fundamental concepts of spectral analysis and understand how the PSD reflects the statistical and frequency properties of different signals, which is a cornerstone of the study and development of modern communication systems.

Index Terms— PSD, señales binarias, sobremuestreo, frecuencia de muestreo, ancho de banda, modulación digital.

Resumen

La práctica tuvo como propósito interiorizar los conceptos de señales aleatorias y su análisis espectral mediante la Densidad Espectral de Potencia (PSD). Se trabajó inicialmente con señales binarias aleatorias bipolares en forma rectangular, evaluando sus características en el tiempo y la frecuencia bajo distintas condi-

ciones de sobremuestreo (Sps). Posteriormente, se analizó el comportamiento del ruido blanco y su PSD, contrastando los resultados con la teoría. También se analizaron señales procedentes de fuentes reales, como una imagen (rana.jpg) y un archivo de audio (Fase I_Pract3_sonido.wav), comparando las diferencias en la PSD según la naturaleza de los datos. Finalmente, se resolvieron preguntas de control orientadas a consolidar los conceptos teóricos y prácticos, incluyendo aspectos como la determinación del ancho de banda, la frecuencia de muestreo, la resolución espectral, y las variaciones en la forma de la señal según diferentes esquemas de modulación digital (OOK, BPSK, ASK, entre otros). En síntesis, la práctica permitió afianzar los conceptos fundamentales del análisis espectral y comprender cómo la PSD refleja las propiedades estadísticas y de frecuencia de distintas señales, lo que constituye un pilar en el estudio y desarrollo de sistemas de comunicación modernos.

1. Introducción

La Densidad Espectral de Potencia (PSD, por sus siglas en inglés) es una herramienta fundamental para el análisis de señales en ingeniería, pues permite describir cómo se distribuye la energía de una señal en función de la frecuencia. Su estudio resulta indispensable en áreas como las telecomunicaciones, la electrónica y el procesamiento digital, ya que posibilita identificar la estructura espectral de señales y extraer información relevante a partir de sus características estadísticas [1]. En esta práctica se busca comprender el comportamiento de diferentes tipos de señales aleatorias, tanto sintéticas como provenientes de fuentes reales, a partir de su representación en los dominios temporal y frecuencial. Se analizan variaciones en los parámetros de muestreo, el impacto del ruido blanco y las diferencias que surgen al trabajar

con datos originados en imágenes y archivos de audio. La importancia de este trabajo radica en consolidar el vínculo entre los fundamentos teóricos del análisis espectral y su aplicación práctica, permitiendo al estudiante desarrollar competencias críticas para el diseño, evaluación y optimización de sistemas de comunicación.

2. Metodología

La práctica se llevó a cabo siguiendo una serie de etapas organizadas que permitieron tanto la comprensión de los flujogramas en GNU Radio como el desarrollo técnico del laboratorio.

2.1. Identificación de bloques y análisis del flujograma

En esta etapa se realizó un análisis detallado del diagrama de bloques, identificando cada componente y su función dentro del flujograma. Para ello, se revisaron los parámetros asociados a cada bloque con el fin de comprender su configuración y la manera en que intervienen en el procesamiento de las señales. A partir de esta revisión, fue posible establecer una expresión general del proceso al que están sometidas las señales aleatorias a medida que atraviesan los diferentes bloques, considerando tanto las operaciones de filtrado, escalamiento o interpolación. Este procedimiento permitió consolidar una visión clara del comportamiento global del sistema y del papel particular de cada bloque en la dinámica del laboratorio.

2.2. Análisis de tiempo y frecuencia en señales aleatorias

En la fase de análisis y tratamiento de datos se recopilaban las salidas gráficas obtenidas a partir del flujograma diseñado en GNU Radio, considerando tanto la representación temporal de las señales como su densidad espectral de potencia (PSD). Inicialmente se estudiaron señales binarias aleatorias bipolares con distintas configuraciones de muestras por símbolo (Sps), lo que permitió comparar la forma de onda, la tasa de bits, el ancho de banda y la frecuencia de muestreo en cada caso. Posteriormente, se evaluó el comportamiento del ruido blanco y se contrastaron sus características estadísticas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Finalmente, se incorporaron fuentes de información provenientes de archivos reales, como imágenes y audio, verificando la manera en que sus bits se traducen en señales procesadas dentro del sistema. Para cada experimento se

registraron gráficas y parámetros principales, los cuales fueron interpretados y documentados con el fin de establecer conclusiones sobre la dinámica de las señales y su tratamiento en un entorno de simulación.

3. Análisis y tratamiento de datos

En esta sección se analizan señales en el dominio del tiempo y la frecuencia, considerando el efecto de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) y la densidad espectral de potencia (PSD). También se estudian las señales obtenidas a partir de un archivo de sonido y de una imagen (foto de la rana). Se evalúa el impacto de la interpolación, observando cómo suaviza la señal en el tiempo y reduce su ancho de banda en frecuencia. Finalmente, se analiza la influencia de la modulación OOK y BPSK, mostrando cómo cada esquema modifica la forma de onda y la distribución de potencia en el espectro.

3.1. Señales en el dominio del tiempo y la frecuencia con ruido blanco en PSD

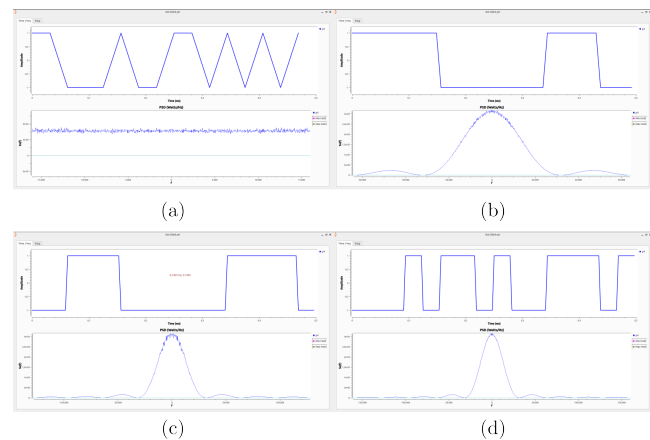


Fig. 1: Análisis de tiempo y frecuencia señal binaria aleatoria bipolar. (a) $Sps = 1$, (b) $Sps = 4$, (c) $Sps = 8$, (d) $Sps = 16$.

Se emplearon cuatro escenarios $sps = 1, 4, 8, 16$, donde sps hace referencia a *samples per symbol* (muestras por símbolo). Este parámetro influye directamente en la representación de la señal en el dominio del tiempo y en la distribución de su espectro en el dominio de la frecuencia.

sps	Tiempo	Frecuencia
1	La señal es muy escasa en muestras. Básicamente es un tren de bits donde cada símbolo está representado por un solo valor, sin interpolación. Parece ruido muy discreto.	El espectro se ve ancho y plano , casi como ruido blanco, porque no hay interpolación que limite el ancho de banda. La PSD se mantiene constante.
4	Cada símbolo tiene más muestras, la señal empieza a verse más continua y no tan abrupta. Se aprecia cierta interpolación entre los bits.	El espectro se concentra un poco más alrededor de bajas frecuencias, pero sigue siendo bastante ancho. La PSD sigue teniendo forma de ruido, pero menos plana.
8	La señal se hace aún más suave, ya que hay más interpolación por símbolo. Se parece a una señal filtrada, con menos saltos bruscos.	El espectro empieza a comprimirse hacia el centro (se reduce el ancho de banda). La potencia se concentra en una franja más estrecha.
16	La señal es claramente continua, mucho más suave y con buena resolución temporal. Cada símbolo está representado por muchas muestras.	El espectro es más angosto . La PSD muestra cómo el filtro FIR ha limitado el ancho de banda, concentrando la energía en frecuencias bajas.

Fig. 2: Comparación del efecto de la interpolación (sps) en la representación temporal y espectral de la señal con ruido blanco en PSD.

A partir de la Fig. 3, se puede aumentar sps, suavizar la señal y reducir el ancho de banda en frecuencia. De igual manera se visualiza que en un sistema real, elegir sps altos mejora la reconstrucción de la señal, pero requiere mayor ancho de banda Ennel dominio digital y más recursos de procesamiento.

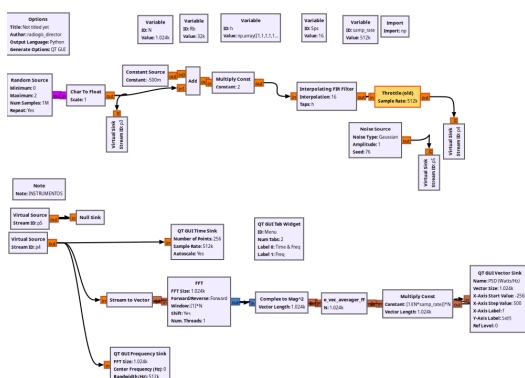


Fig. 3: Diagrama de bloques implementado para AWGN y PSD.

3.2. Señales cuando los bits provienen de una fuente del mundo real

El flujograma propuesto en la Fig. 4 inicia con un bloque File Source, encargado de leer un archivo de imagen, cuyos datos son convertidos en una secuencia de bits. Estos bits son desempaquetados mediante el bloque Unpack K Bits, que transforma la información en un flujo binario legible dentro del entorno de GNU Radio. Posteriormente, los datos son escalados y adaptados para ser representados como una señal bipolar rectangular, la cual atraviesa diferentes bloques de procesamiento que

permiten su interpolación, filtrado y visualización en el dominio del tiempo y de la frecuencia. La estructura también incluye un Noise Source de tipo gaussiano, que puede añadirse al flujo de la señal para observar el efecto del ruido en las representaciones temporales y espectrales. Finalmente, los resultados se observan mediante los bloques QT GUI Time Sink y QT GUI Frequency Sink, que despliegan la forma de onda y la densidad espectral de potencia (PSD). En síntesis, este flujograma permite modelar el tránsito de una señal proveniente de datos reales a través de un sistema de comunicación digital, analizando cómo se modifica su comportamiento estadístico y espectral en cada etapa.

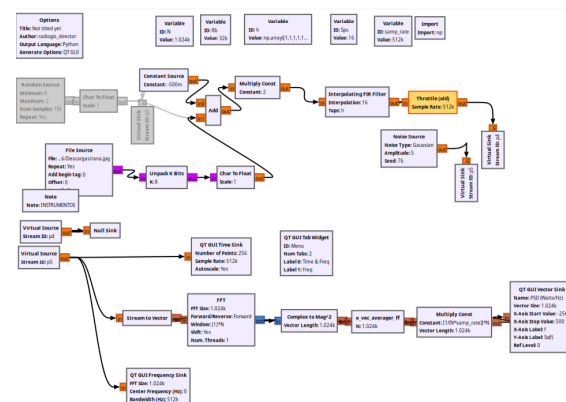


Fig. 4: Diagrama de bloques cuando los bits provienen de una fuente del mundo real.

Se estudió cómo cambia la PSD al variar el parámetro Sps como se muestra en la Fig. 5. Para el caso cuando $Sps = 4$, la señal resultante presenta un espectro ancho, ya que se utiliza una cantidad mínima de muestras por símbolo. Esto genera aliasing y una representación poco precisa de la información contenida en la imagen. Al aumentar a $Sps = 8$, la resolución temporal de la señal mejora. La energía se concentra en torno al componente de continua (DC), reflejando la predominancia del color verde en la imagen de la rana. Este predominio se traduce en un nivel de DC más alto, ya que la señal contiene una mayor proporción de bits asociados a dicho color en el formato binario. Con $Sps = 16$, la representación temporal es mucho más detallada, mientras que la PSD se concentra aún más en torno a la frecuencia de DC, reduciendo la dispersión espectral. Este resultado evidencia cómo el aumento de Sps mejora tanto la visualización de la señal como la estabilidad de la energía en el espectro.

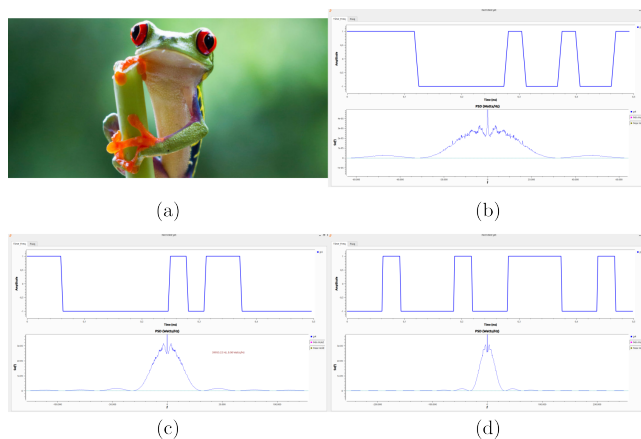


Fig. 5: Análisis de tiempo y frecuencia cuando los bits provienen de una fuente del mundo real (Cámara fotográfica). (a) *rana.jpg*, (b) $Sps = 4$, (c) $Sps = 8$, (d) $Sps = 16$.

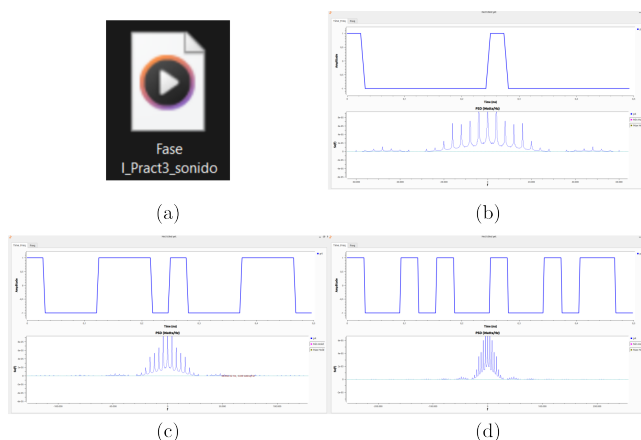


Fig. 6: Análisis de tiempo y frecuencia cuando los bits provienen de una fuente del mundo real (Micrófono). (a) *FaseI_Pract3_sonido.wav*, (b) $Sps = 4$, (c) $Sps = 8$, (d) $Sps = 16$.

En el flujograma mostrado en la Fig. 4 se reemplaza la fuente aleatoria de bits por un bloque que lee directamente un archivo de imagen (en este caso *rana.jpg*), el cual se transforma en una secuencia de bits mediante el bloque *Unpack K Bits*. Este proceso permite que los datos procesados correspondan a información real, proveniente de una cámara fotográfica o un archivo de imagen, en lugar de una fuente sintética. La intuición es que, al utilizar información de una imagen, la señal que se propaga a través del sistema conserva patrones característicos del contenido visual original, reflejándose en sus representaciones temporal y espectral.

Se realizaron experimentos mostrados en la Fig. 6 variando el parámetro Sps con valores de 4, 8 y 16, observándose que al reducir este valor, la señal en el tiempo presenta transiciones más abruptas y, en consecuencia, su PSD se dispersa ocupando un mayor ancho de banda con lóbulos laterales pronunciados, mientras que al incrementar el Sps los pulsos se representan con mayor resolución y suavidad.

3.3. Modulación de señales digitales aleatorias

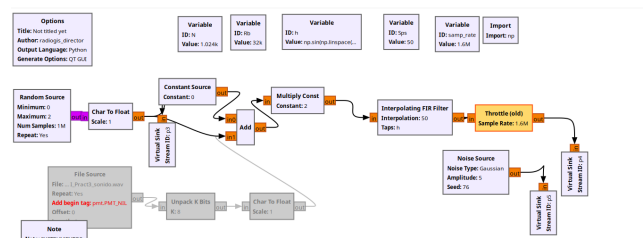


Fig. 7: Modificación en el diagrama de bloques para obtener modulaciones digitales.

El flujograma mostrado en la Fig. 7 corresponde al mismo esquema utilizado previamente para señales de bits provenientes de fuentes reales (como archivos de imagen o audio), con la diferencia de que aquí el bloque de filtrado FIR se reemplaza por el uso de funciones seno y coseno, lo cual permite implementar modulaciones digitales como OOK y BPSK. De esta manera, la secuencia binaria obtenida se transforma en una señal modulada en banda pasante, que posteriormente se somete a procesos de interpolación, adición de ruido y análisis espectral.

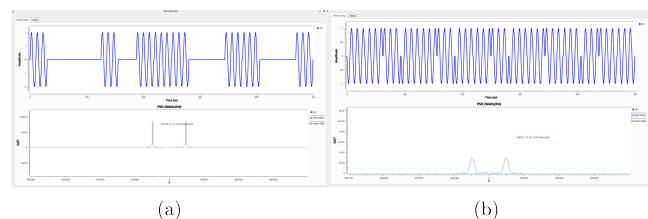


Fig. 8: Modulaciones digitales. (a) Señal OOK, (b) Señal BPSK.

En la Fig. 8 se muestran las representaciones en tiempo y frecuencia para dos esquemas de modulación digital distintos. En la modulación OOK (On-Off Keying) se observan tramos donde la portadora senoidal está presente para representar un bit "1" y otros donde desaparece para indicar un bit "0", lo que genera una señal clara-

mente pulsada en amplitud. En la PSD de esta modulación, se aprecian picos alrededor de la frecuencia central de la portadora junto con cierta dispersión lateral, consecuencia de las transiciones abruptas entre presencia y ausencia de la onda, de modo que la energía se concentra en torno a la portadora. En cambio, en la modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying) la portadora se mantiene constante en amplitud y varía su fase entre 0 y π según los bits transmitidos, produciendo una señal continua sin intervalos de silencio y una PSD más concentrada y uniforme alrededor de la portadora. Frente a una transmisión de bits sin portadora, como ocurre en banda base con pulsos rectangulares, ambos esquemas presentan la ventaja de desplazar el espectro hacia una frecuencia central que facilita la transmisión inalámbrica, evita interferencias en bajas frecuencias y permite aprovechar técnicas de filtrado y multiplexado en frecuencia, siendo BPSK la más eficiente espectralmente y también más robusta frente al ruido, ya que mantiene la portadora activa y no depende de su ausencia para la representación de bits.

4. Conclusiones

El análisis mostró que la presencia de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) se refleja en la densidad espectral de potencia (PSD) como una distribución prácticamente plana a lo largo del espectro. Esto significa que el AWGN aporta energía en todas las frecuencias de manera uniforme, generando un ensanchamiento del espectro y reduciendo la relación señal a ruido (SNR). En consecuencia, la PSD de la señal afectada evidencia la pérdida de nitidez en la información original y resalta la importancia de técnicas de filtrado y modulación para mitigar este impacto en sistemas de comunicación.

El análisis del flujograma y de la PSD para diferentes valores de Sps permitió evidenciar cómo la variación en

el número de muestras por símbolo influye directamente en la representación temporal de la señal y en la concentración de su energía espectral. A medida que aumenta Sps, la forma de onda se describe con mayor precisión y la densidad espectral se estabiliza, concentrándose en torno a las bajas frecuencias y especialmente en la componente de continua, lo cual se relaciona con la predominancia del color verde en la imagen procesada. Esto demuestra que el ajuste adecuado de Sps resulta fundamental para optimizar la calidad de la señal y garantizar un análisis más fiel del contenido transmitido.

La modulación OOK presenta un comportamiento espectral muy similar al de la modulación AM de doble banda lateral con portadora suprimida (DSBC), ya que en ambos casos el espectro se caracteriza por dos picos simétricos alrededor de la frecuencia central y un ensanchamiento debido a las transiciones abruptas de la señal en el tiempo. Por otro lado, la BPSK concentra mejor la energía alrededor de la portadora y reduce la presencia de componentes en bajas frecuencias, lo que la hace más eficiente y robusta en entornos ruidosos. En términos generales, tanto OOK como BPSK comparten el principio de desplazar la señal hacia una banda pasante, lo que facilita la transmisión inalámbrica y el aprovechamiento del espectro, pero mientras OOK hereda propiedades espectrales casi idénticas a las de la AM-DSBC, la BPSK logra una mayor concentración de potencia en torno a la portadora, optimizando la eficiencia espectral.

Referencias

- [1] jpatterson, "What is power spectral density, and why is it important?" 7 2024, [Online; accessed 2025-09-20]. [Online]. Available: <https://liquidinstruments.com/blog/what-is-power-spectral-density-and-why-is-it-important/>