

# Laboratorio de Comunicaciones Digitales N°4:

## Modulación Pasabanda de Señales Binarias

Bastían Ortiz de Zárate Vergara, bastian.ortizdezarate\_v@mail.udp.cl

Hugo Martínez Sánchez, hugo.martinez2@mail.udp.cl

Donovan Iturra Valdivia, donovan.iturra@mail.udp.cl

**Profesor:** Marcos Fantoval Castro

**GitHub:** <https://github.com/Nait-Nait/digital-communications-lab-4>

Escuela de Informática y Telecomunicaciones

*Universidad Diego Portales*

### I. INTRODUCCIÓN

La transmisión digital de información a través de canales ruidosos requiere evaluar la confiabilidad del sistema en términos de la cantidad de errores introducidos durante la comunicación. Una de las métricas más utilizadas para esta evaluación es la Tasa de Error de Bit (BER, por sus siglas en inglés Bit Error Rate), que representa la proporción de bits recibidos incorrectamente respecto del total transmitido. Esta medida permite caracterizar el desempeño de un sistema frente a condiciones de ruido e interferencia, y se utiliza como referencia para comparar distintas configuraciones de modulación y codificación.

En el contexto de este laboratorio, se abordará el análisis del BER mediante la implementación de un sistema de comunicaciones digitales en banda base utilizando la herramienta GNU Radio. Se utilizarán modulaciones digitales de tipo BPSK, QPSK y 8PSK, junto con un canal simulado con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), y se medirá el BER en función de la relación  $E_b/N_0$  para valores entre 1 y 11 dB. El sistema estará compuesto por un transmisor, un receptor y un canal, todos diseñados con bloques modulares de GNU Radio.

La actividad permitirá comprender cómo el tipo de modulación influye frente al ruido, visualizar de forma práctica los conceptos teóricos de la comunicación digital y analizar el comportamiento del sistema en condiciones controladas. Además, se requiere una preparación previa que incluye el estudio y comprensión de bloques fundamentales de GNU Radio, así como el análisis de los métodos.

De este modo, la experiencia entregará una visión sobre el impacto del canal ruidoso en la transmisión digital, permitiendo establecer relaciones directas entre teoría y simulación.

### II. METODOLOGÍA

#### A. Metodología de Actividad Previa

A continuación se describe paso a paso la metodología empleada en la preparación del laboratorio.

##### 1) Explicación de los bloques byte pack y byte unpack

Como parte de la preparación previa, se revisó el funcionamiento de los bloques byte pack y byte unpack en GNU

Radio. El bloque byte pack permite agrupar una secuencia de bits individuales en unidades de 8 bits, formando un byte. En cambio, el bloque byte unpack descompone cada byte en sus 8 bits originales, permitiendo recuperar la información bit a bit.

##### 2) Estudio de los bloques fundamentales de GNU Radio

Se estudiaron y se definieron los bloques para la construcción de un sistema de transmisión digital con canal ruidoso. A continuación se explican sus funciones:

- **Random Source:** Genera una secuencia binaria aleatoria, simulando una fuente digital de información sin patrones definidos.
- **Chunks to Symbols:** Convierte bloques de bits en símbolos complejos, mapeándolos según la constelación especificada (como BPSK, QPSK o 8PSK). Permite representar los datos binarios en el dominio de la señal modulada.
- **Noise Source:** Introduce ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) en el canal, simulando interferencias reales del entorno y permitiendo estudiar la degradación de la señal en condiciones controladas.
- **Constellation Decoder:** Decodifica los símbolos ruidosos recibidos, comparándolos con los puntos de referencia de la constelación. Devuelve los bits más probables asociados a cada símbolo, utilizando decisiones por distancia mínima.
- **BER:** Compara los bits originales transmitidos con los recibidos tras el canal ruidoso y calcula la Tasa de Error de Bit (BER).
- **QT GUI Number Sink:** Permite visualizar valores numéricos en tiempo real durante la simulación. Se utilizó para mostrar el BER actualizado, ayudando con la interpretación dinámica de los resultados.

##### 3) Comprensión de los métodos de la clase "gr::digital::constellation"

Finalmente, se estudiaron los métodos principales de la clase "gr::digital::constellation", esenciales para definir el comportamiento matemático de las modulaciones empleadas:

- **arity():** Devuelve el número total de símbolos posibles en la constelación ( $M$ ). Por ejemplo, para BPSK es 2, para QPSK es 4 y para 8PSK es 8.
- **points():** Retorna las coordenadas complejas de los puntos que componen la constelación. Estas definen gráficamente las posiciones relativas de los símbolos en el plano I/Q.
- **base():** Indica la base del sistema de codificación utilizado (por lo general, base 2 para sistemas binarios).
- **bits\_per\_symbol():** Calcula el número de bits que representa cada símbolo, determinado por la relación  $\log_2(M)$ . Por ejemplo, QPSK codifica 2 bits por símbolo y 8PSK codifica 3.

### B. Metodología de la Actividad en Laboratorio Presencial

Se implementó en GNU Radio un sistema de comunicaciones digitales en banda base, con el objetivo de evaluar la Tasa de Error de Bit (BER) en función de la relación  $E_b/N_0$  para distintas modulaciones digitales. La construcción del sistema se realizó reutilizando los bloques estudiados en la actividad previa, complementados con aquellos necesarios para medir y visualizar el desempeño del canal bajo ruido gaussiano aditivo (AWGN).

#### 1) Configuración general del sistema

El sistema completo fue diseñado en un único diagrama de flujo que incluye las etapas de transmisión, canal y recepción. Se utilizó un bloque de tipo *Random Source* para generar una secuencia aleatoria de símbolos, los cuales fueron mapeados a una constelación mediante el bloque *Chunks to Symbols*. La selección de la constelación (BPSK, QPSK u 8PSK) se controló a través de una variable conectada al bloque correspondiente.

La señal modulada fue sumada con ruido blanco gaussiano generado mediante el bloque *Noise Source*, cuya amplitud se ajustó dinámicamente utilizando un deslizador QT GUI para representar distintos niveles de  $E_b/N_0$ . Esta configuración permitió simular el canal con degradación controlada.

#### 2) Recepción y cálculo del BER

En el receptor, la señal fue procesada por el bloque *Constellation Decoder*, que aplicó detección coherente para estimar los símbolos transmitidos a partir de los puntos recibidos en el plano I/Q. A continuación, los datos estimados fueron comparados bit a bit con los datos originales utilizando el bloque *Error Rate*, configurado para operar en modo BER (Bit Error Rate).

Para asegurar una visualización clara y continua de los resultados, se utilizaron bloques *QT GUI Number Sink* para mostrar el valor actual de BER, y *QT GUI Constellation Sink* para observar la dispersión de los símbolos recibidos en la constelación.

### 3) Parámetros de simulación

Se fijó la tasa de muestreo del sistema en 100 kHz mediante el bloque *Throttle*, y se generaron secuencias de  $10^7$  símbolos por iteración para asegurar una medición estadísticamente significativa del BER. El rango de variación de  $E_b/N_0$  fue definido entre 1 y 11 dB, ajustando únicamente la amplitud del ruido blanco sin modificar la energía de los bits transmitidos, en concordancia con las instrucciones del laboratorio.

El procedimiento fue repetido para cada esquema de modulación (BPSK, QPSK y 8PSK), y se registraron los valores de BER correspondientes para distintos niveles de  $E_b/N_0$ , con el fin de analizar comparativamente el impacto del tipo de modulación sobre la robustez frente al ruido.

### C.

## III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### A. Actividades previas

#### 1) Análisis del uso de byte pack y byte unpack en GNU Radio

Durante el desarrollo del sistema, se evidenció la importancia funcional de los bloques *byte pack* y *byte unpack*, especialmente en el proceso de adaptación entre niveles de representación binaria.

Se observó que al utilizar modulaciones como BPSK, que operan a nivel de bits individuales, fue necesario desacoplar y luego reagrupar los datos en bloques de 8 bits para ciertas etapas de procesamiento. Sin estos bloques, la ejecución del sistema no hubiera sido posible sin errores o incompatibilidades en el flujo de datos.

#### 2) Evaluación funcional de módulos clave en GNU Radio

Más allá de su definición teórica, el uso práctico de los bloques en GNU Radio permitió visualizar su impacto directo en la calidad de la transmisión. A continuación se comentan observaciones específicas sobre los módulos más relevantes:

- *Random Source:* Aunque su función es simplemente generar una secuencia aleatoria, fue útil para probar el sistema en escenarios realistas, ya que no introducía patrones que pudieran favorecer artificialmente a los decodificadores.
- *Chunks to Symbols:* Se notó que su configuración era importante; una mala selección de constelación o codificación generaba resultados incoherentes en el BER. Esto ayudó a ver su rol como puente entre la representación digital y la forma física de la señal.
- *Noise Source:* Al variar su amplitud, se pudo visualizar claramente cómo el sistema se degrada ante mayor ruido, confirmando la sensibilidad de cada tipo de modulación. Fue el principal factor para construir una curva BER vs.  $E_b/N_0$ .
- *Constellation Decoder:* En situaciones con alto nivel de ruido, este bloque mostró su límite, fallando en reconocer los símbolos correctos. Esto permitió evidenciar cómo la distancia entre puntos de constelación afecta la tasa de error.

- **BER:** Fue una herramienta esencial para cuantificar el desempeño del sistema. Su valor numérico permitió comparar objetivamente las modulaciones, revelando las fortalezas de BPSK y las debilidades de 8PSK en entornos ruidosos.
- **QT GUI Number Sink:** Aunque no altera el procesamiento, fue clave para el análisis en tiempo real. Permitió observar cómo pequeñas variaciones en el ruido modificaban el BER de manera sensible.

Finalmente, estos bloques permiten diseñar, probar y analizar un sistema de comunicación digital de manera simulada, enfocándose en cómo el ruido impacta la transmisión de información y qué tan bien el receptor logra recuperar los datos. Para esto, los bloques fueron implementados de la manera que se muestra en la figura 1.

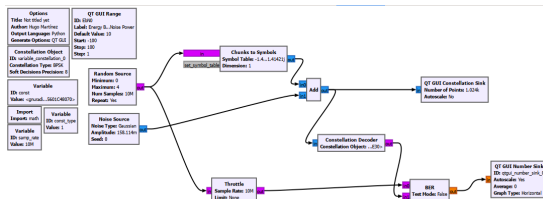


Fig. 1. Diagrama de bloques GnuRadio.

### 3) Reflexión sobre métodos de `gr::digital::constellation`

La experimentación con métodos como `arity()`, `points()`, `base()` y `bits_per_symbol()` permitió comprender con mayor profundidad el vínculo entre la estructura matemática de una constelación y su implementación en el sistema.

- **`arity()`:** Al cambiar entre BPSK, QPSK y 8PSK, se comprobó que el número de símbolos influye directamente en la complejidad y el BER. A mayor aridad, mayor eficiencia espectral, pero menor tolerancia al ruido.
- **`points()`:** Visualizar las posiciones en el plano I/Q ayudó a interpretar por qué ciertas modulaciones son más robustas. Las constelaciones más dispersas, como BPSK, tienen mayor margen de decisión frente a interferencias.
- **`base()`:** Aunque siempre se trabajó en base 2, fue útil para reforzar la noción de codificación digital subyacente y la relación con la modulación elegida.
- **`bits_per_symbol()`:** Se observó que, aunque más bits por símbolo suponen una mayor eficiencia, también aumentan el riesgo de error. En la práctica, este trade-off fue evidente al comparar los resultados de 8PSK con BPSK.

En resumen, estos métodos permiten al sistema saber cómo convertir bits en señales y viceversa, y cómo interpretar correctamente los datos a lo largo de la transmisión.

### B. Actividades laboratorio presencial

La implementación del bloque "QT GUI Constellation Sink" permitió realizar un mejor análisis al poder visualizar la recepción de la señal, representando gráficamente las muestras recibidas en el plano I/Q, mostrando de mejor manera el nivel de ruido y el cómo afecta en la recepción de una señal.

Mediante la observación de este, tal como se muestra en la figura 2, es posible apreciar los cúmulos de puntos presentes en el diagrama, representando los símbolos modulados recibidos. En este es posible ver el efecto del ruido y cuán fuerte es, generando una mayor dispersión, pudiendo generar errores a la hora de sobreponerse valores sobre otra zona vecina.

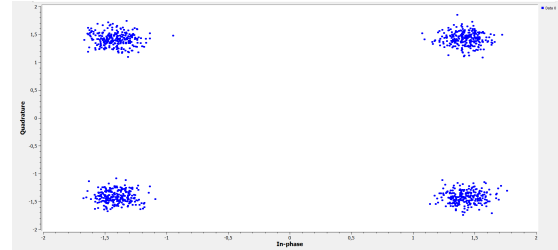


Fig. 2. Diagrama de constelación.

Al momento de realizar la variación entre 1dB y 11dB se pudo apreciar los siguientes resultados. En la figura 3 es posible observar que, con un valor de 1dB, se presenta una mayor dispersión de los valores, obteniendo un valor del bloque "BER" de aproximadamente -5, lo cual representa una tasa de error cercana a los  $10^{-5}$ , o de 1 error por cada 100000 símbolos.

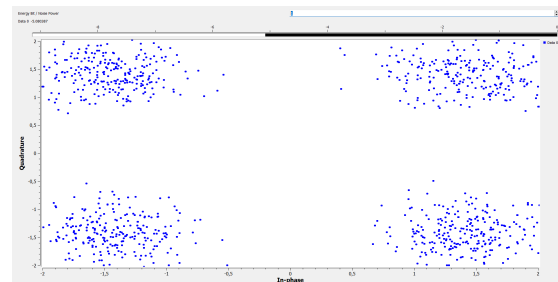


Fig. 3. Constelación y BER con 1 dB.

Mientras que, con un valor de 11dB, se presenta una menor dispersión, generando cúmulos mas compactos, tal como se muestra en la figura 4, y obteniendo un valor del bloque "BER" aproximado de -8, representando una tasa de error cercana a  $10^{-8}$ , o de un error por cada 100000000 símbolos.

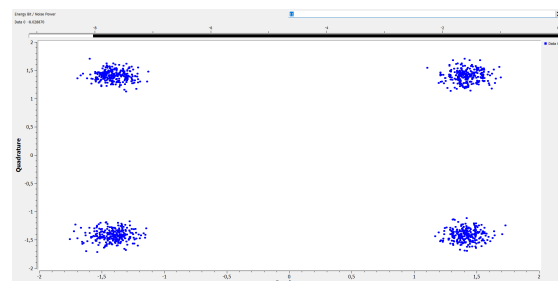


Fig. 4. Constelación y BER con 11 dB.

#### IV. CONCLUSIONES

En este laboratorio se logró analizar el comportamiento de sistemas de comunicación digital bajo ruido, utilizando modulaciones BPSK, QPSK y 8PSK. A través del cálculo del BER frente a distintas relaciones  $E_b/N_0$ , se comprendió cómo el tipo de modulación influye en la robustez del sistema.

La implementación práctica en GNU Radio permitió visualizar en tiempo real el efecto del ruido sobre las constelaciones y cuantificar la tasa de errores, facilitando la conexión entre teoría y simulación.

Durante el desarrollo del laboratorio se presentaron algunas complicaciones, para las que se tuvo que adaptar el diseño presentado en la guía a los bloques disponibles en el software utilizado. A pesar de esto, se pudo adaptar correctamente y cumplir satisfactoriamente los objetivos.

En definitiva, la experiencia permitió evaluar comparativamente distintas modulaciones digitales, reforzando el entendimiento del impacto del canal ruidoso.

#### V. REFERENCIAS

##### REFERENCES

- [1] H. Kopka and P. W. Daly, *A Guide to L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X*, 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.