

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INFORMÁTICA**



## **Laboratorio N°3**

Integrantes: Christian Méndez

Israel Arias

Curso: Redes de computadores

Profesor: Carlos González

Ayudante: Miguel Salinas

9 de Julio de 2022

# Tabla de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>2</b>
<b>3. Desarrollo de la experiencia</b>	<b>4</b>
3.1. Implementación de modulación digital OOK . . . . .	4
3.2. Creación de demodulador digital OOK . . . . .	4
3.3. Implementación de simulador de canal Gaussiano (AWGN) . . . . .	5
3.4. Simulación y análisis de rendimiento . . . . .	6
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>7</b>
4.1. Comprobación de implementaciones realizadas . . . . .	7
4.1.1. Comprobación modulación OOK . . . . .	7
4.2. Comprobación demodulador OOK . . . . .	8
4.3. Resultados simulación sistema de comunicación en canal AWGN . . . . .	8
4.4. Preguntas propuestas para la experiencia . . . . .	9
4.4.1. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de la modulación digital? . . .	9
4.4.2. ¿Cuáles son los principales usos para la modulación digital? . . . . .	9
4.4.3. ¿De qué depende la tasa de errores de un sistema de comunicación digital? . . . . .	10
4.4.4. ¿Cómo se puede mejorar la tasa de errores de un sistema de comuni- cación digital? . . . . .	10
4.5. ¿Cómo afecta el ruido a la tasa de datos del sistema? . . . . .	10
4.5.1. ¿Cómo se puede mejorar la tasa de datos de un sistema de comunicación digital? . . . . .	10
<b>5. Conclusión</b>	<b>11</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>12</b>

# 1. Introducción

En la actualidad las redes de computadores son vitales en la actividad humana, la transmisión de información que es posible a través de ellas se ha vuelto indispensable “Desde los precarios sistemas de transmisión en base a señales de humo, palomas mensajeras, o mensajeros que recorrían a caballo largas distancias, hasta llegar a las tecnologías de última generación como los teléfonos celulares, o una comunicación satelital. En la actualidad, la transmisión de datos utilizando señales eléctricas ha reemplazado, casi a la totalidad de cualquier otro tipo de transmisión de información, dado que es más fácil controlarla, amplificarla y digitalizarla, para su posterior manipulación.” (Gobierno de la provincia de Buenos Aires, 2009).

Es debido a esta importancia que, con el fin de seguir aprendiendo respecto al procesamiento de señales en el presente informe, se detalla la experiencia N°3 de laboratorio de la asignatura Redes de Computadores, en la cual el principal objetivo consiste en profundizar los conceptos de modulación digital para la transmisión y recepción de señales, para esto usando el lenguaje de programación Python 3, se implementara un modulador y demodulador digital, para posteriormente simular la transmisión de datos digitales a través de un modelo de canal y determinar el rendimiento del sistema simulado. Se busca entender el funcionamiento de todo el procedimiento y sobre los factores que afectan a la transmisión de datos digitales. Como objetivo secundario, también se busca el seguir aprendiendo de como un lenguaje como Python 3 puede ser aplicado al estudio y procesamiento de señales a través de sus distintas librerías, pudiendo modificarlas, aplicar operaciones matemáticas y generar gráficos personalizados facilitando el estudio y análisis de estas.

## 2. Marco Teórico

En esta sección se definirán distintos conceptos que se presentaran a lo largo del informe que se consideran relevantes para la comprensión del trabajo desarrollado:

- Señal: Según Fernández (2021) “son la representación eléctrica de los datos. Los diferentes medios de transmisión permiten el envío de los datos en forma de variaciones de parámetros eléctricos, como tensiones o intensidades.”
- Señal análoga: Fernández (2021) las define como “señales en que la intensidad de la señal varía suavemente en el tiempo y pueden tomar cualquier valor en el tiempo.”
- Señal digital: Fernández (2021) menciona que “es una señal en la cual la intensidad se mantiene constante durante un intervalo de tiempo, tras el cual la señal cambia a otro valor constante. Las variaciones de la señal sólo pueden tomar valores discretos.”
- Frecuencia: Es la razón en la cual una señal se repite, se mide en Hertz.
- Amplitud: medida que expresa la distancia entre un punto y el eje horizontal en un cierto momento.
- Señal portadora: Señal sinusoidal usada para transportar un mensaje.
- Señal modulada: Señal resultante al multiplicar la señal moduladora por la señal portadora.
- Modulación: Cambiar un aspecto de la señal portadora con respecto a una señal moduladora.
- Modulación digital: Mismo concepto que modulación, sin embargo se transmiten datos digitales, es decir, solo unos y ceros.
- Demodulación: Proceso en el cual se recupera la señal que contiene el mensaje de una señal modulada.
- Modulación ASK: “Es una modulación de amplitud donde la señal moduladora (datos) es digital. Los dos valores binarios (0 y 1) se representan con dos amplitudes diferentes y es usual que una de las dos amplitudes sea cero.” (Científicos, 2005).

- Modulación OOK: Caso particular de modulación ASK, donde el bit 0 es representado por la ausencia de una portadora.
- Ruido: Drake (2005) menciona “que se entiende toda componente de tensión o intensidad indeseada que se superpone con la componente de señal que se procesa o que interfiere con el proceso de medida.”
- SNR: “La relación señal-ruido, S/R o del inglés SNR (Signal to Noise Ratio) se define como la proporción existente entre la potencia de salida de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe (por lo tanto hablamos únicamente de dispositivos que emiten sonido y nunca de dispositivos que lo captan). Este margen se mide, como casi todo lo relacionado con el audio, en decibelios.” (Alonso, 2021)
- BER: Tasa de error de bits, se calcula mediante el cociente entre la cantidad de bits erróneos recibidos y la cantidad total de bits recibidos.

### 3. Desarrollo de la experiencia

En esta sección se detallará las actividades realizadas en esta experiencia de laboratorio.

#### 3.1. Implementación de modulación digital OOK

Para realizar esta experiencia de laboratorio se decidió el implementar una modulación digital OOK (On Off Keying), esta modulación es en realidad un caso específico de la modulación digital ASK (Amplitude Shift Keying) en la cual la amplitud de la señal a utilizar para modular el bit 0 posee una amplitud de cero, o sea  $A\cos(w_c t)$  con  $A = 0$ . Se puede observar que el modulador fue implementado como se puede ver en el diagrama de bloques de la figura 1 en el cual entra una secuencia de bits en forma de arreglo, la función moduladora va creando la señal modulada leyendo bit por bit concatenando en un arreglo inicialmente vacío la señal con Amplitud igual a cero cuando se trata de un bit cero y concatenando la señal que si posee amplitud cuando lee un bit uno.

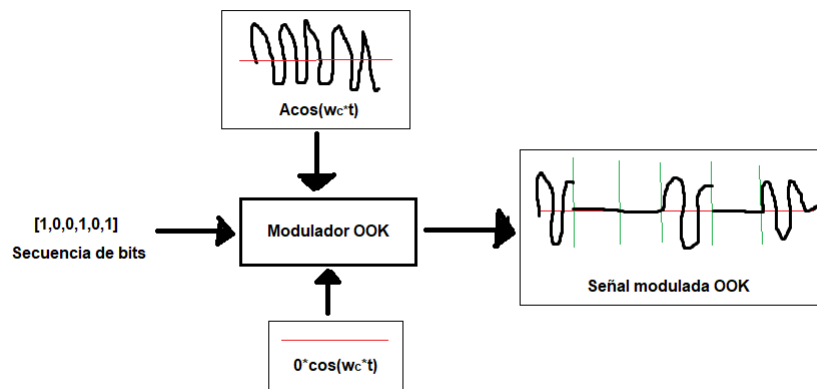


Figura 1: Diagrama de bloques modulación OOK

#### 3.2. Creación de demodulador digital OOK

Para demodular la señal modulada, es necesario multiplicar esta por el coseno utilizado para representar el bit 1, luego calcular un par de parámetros relevantes como lo

son: la **cantidad de bits que posee la señal modulada** el cual es determinado por medio del tiempo final de la señal modulada dividido en el tiempo de bit (inverso de la tasa de bits), luego la **cantidad de elementos en el arreglo de tiempo que corresponden a un tiempo de bit** determinado a través del largo del arreglo de tiempo dividido en la cantidad de bits calculados previamente. A continuación se realiza un ciclo por cada bit de la señal, en cada ciclo se realiza una sumatoria de las amplitudes asociadas al inicio del tiempo de bit hasta el final del tiempo de bit, para determinar tanto el inicio como el final, se utiliza la cantidad de elementos por tiempo de bit. Para ejemplificar esta sumatoria, si la cantidad de elementos por tiempo de bit fuera de 1000, el inicio de la sumatoria seria desde 0 hasta 999, sumando así las amplitudes asociadas al primer bit de la señal, luego la sumatoria seria desde 1000 hasta 1999, asociado a las amplitudes del segundo bit de la señal, así continuaría hasta obtener todos los bits. Por medio de la experimentación logramos denotar que las sumatorias que superan el valor 10 suelen estar asociadas al bit 1, valores menores a este al bit 0, por lo cual si el resultado de la sumatoria supera el valor 10 se agrega un 1 a la cadena de bits de salida, en caso de ser menor un 0.

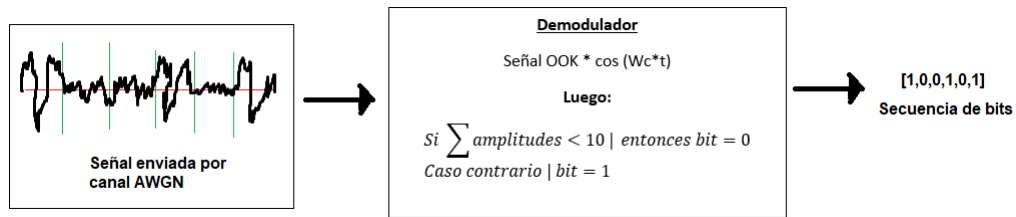


Figura 2: Diagrama de bloque de Demodulador

### 3.3. Implementación de simulador de canal Gaussiano (AWGN)

Con el fin de poder simular el funcionamiento de un sistema de transmisión de datos en un ambiente más realista es que se implementa un canal gaussiano (Additive white Gaussian noise), el cual naturalmente presenta ruido, al ingresar la señal modulada a este canal gaussiano se le suma el ruido gaussiano blanco aditivo, generando una nueva señal con ruido agregado. La implementación de este canal se realiza recibiendo la señal modulada en OOK y el valor de la relación señal-ruido (SNR), a partir de este ultimo se genera un arreglo de datos que sigue una distribución normal con media 0 y desviación estándar 1  $N(0, 1)$ , con

la misma cantidad de elementos que la señal que ingresa a la función, la potencia de esta señal se puede variar multiplicándola por su varianza  $\sigma$ , esta es posible calcularla a través de la SNR considerando la expresión  $\sigma = \sqrt{\frac{P_{signal}}{SNR_{lineal}}}$ . La SNR lineal es la conversión de SNR lineal realizada por  $SNR_{lineal} = e^{\frac{SNR_{db}}{10}}$ , mientras que el poder de la señal es posible calcularlo como la sumatoria de elevar al cuadrado cada elemento del arreglo, o sea  $P_{signal} = \sum |A^2|$ . Finalmente se suma este ruido gaussiano blanco aditivo generado a la señal original entrante, simulando de esta forma el canal AWGN en el cual se transmiten los datos, es posible observar un diagrama de bloques de lo expuesto en la figura 3.

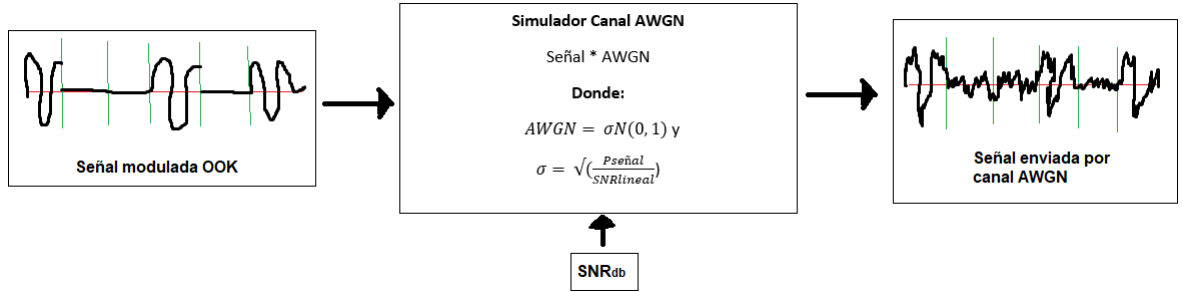


Figura 3: Diagrama de bloques simulación de canal Gaussiano

### 3.4. Simulación y análisis de rendimiento

Con todos los elementos anteriores presentados y con el fin de analizar el rendimiento (perdida de bits) de la modulación digital implementada al transmitir datos por un canal AWGN es que procede a simular un sistema de comunicación, en el cual se generara un arreglo de bits aleatorio con largo  $10^5$  para asegurar que tenga una convergencia estadística y produzca resultados válidos, este arreglo de bits será modulado y se simulara su transmisión por el canal AWGN implementado, para luego demodularlo y calcular la tasa de errores de bit  $BER = \frac{BitsErroneos}{BitsTotales}$ . Esto se repetirá usando 10 niveles de la SNR para generar el canal AWGN entre los rangos de -2 y 10 dB, finalmente esto se repetirá para tres tasas de bits diferentes. El rendimiento será graficado para cada tasa de bit y SNR utilizada para poder ser estudiado.



## 4. Análisis de resultados

En esta sección se busca responder y dar explicación a las preguntas propuestas en la experiencia de laboratorio de acuerdo con los resultados conseguidos, además se busca comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas implementados.

### 4.1. Comprobación de implementaciones realizadas

Con el fin de comprobar que el modulador y demodulador fue implementado correctamente es que se realizara una prueba con un arreglo de bits pequeño, correspondiente al arreglo  $[1, 0, 0, 1]$ .

#### 4.1.1. Comprobación modulación OOK

Al modular el arreglo se obtuvo la señal visible en la figura 4, es posible observar que en efecto se concateno correctamente las señales correspondientes de acuerdo a si el bit correspondía a un uno o un cero, por lo que se comprueba el correcto funcionamiento del modulador.

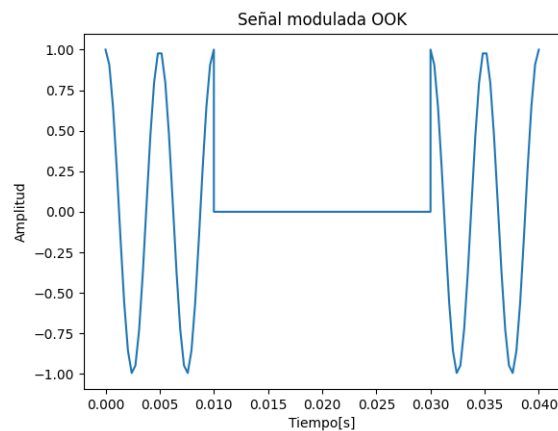


Figura 4: Ejemplo de bits modulados OOK

## 4.2. Comprobación demodulador OOK

Al ingresar la señal modulada de la figura 4 en el demodulador implementado retorna el arreglo de bits  $[1, 0, 0, 1]$ , siendo la misma que entro originalmente, por lo que se comprueba el correcto funcionamiento del modulador. Esto puede ser observado en el código de python adjunto a la entrega de este informe.

## 4.3. Resultados simulación sistema de comunicación en canal AWGN

En la sección de desarrollo se explico que se efectuaría una simulación de un canal de comunicación de bits aleatorios con el objetivo de evaluar cuantos bits se pierden debido al ruido del canal AWGN, esto medido a través del BER o tasa de bits erróneos, en la gráfica de la figura 5 es posible observar los resultados de esta simulación, en la cual con color rojo se puede observar los resultados para una tasa de bits de  $100[bps]$ , con color verde una tasa de bits de  $1100[bps]$  y con azul una tasa de bits de  $3100[bps]$ . Respecto a esta gráfica es posible el observar el como independiente de la tasa de bits utilizada la tasa de errores de bit (BER) fue disminuyendo a medida que la razón de señal-ruido (SNR) fue aumentando, esto tiene sentido, debido a que la SNR relaciona la potencia del ruido y la del ruido, entonces valores mayores de la SNR para un mismo canal AWGN simulado significa que tiene mayor potencia el ruido que el ruido que interfiere en la comunicación, es por esto que se obtienen menor tasa de errores a mayor SNR.

Respecto al comportamiento de la tasa de errores de bit respecto a la tasa de bits se puede observar que todas las tasas de bits siguieron la misma tendencia, para las tres tasas de bits simuladas el error fue disminuyendo hasta el punto de llegar a un error de cero para determinados SNR, si es posible observar que para la menor tasa de bit correspondiente a 100, alcanzo un error de cero para un valor menor a la SNR antes que las otras tasas de bits, incluso luego la tasa de errores de el bitrate de  $3100[bps]$  aumento antes de volver a caer, este comportamiento se mantuvo de forma constante en las distintas simulaciones realizadas, lo que indica que la velocidad de transmisión o bitrate aumenta la tasa de errores por bit.

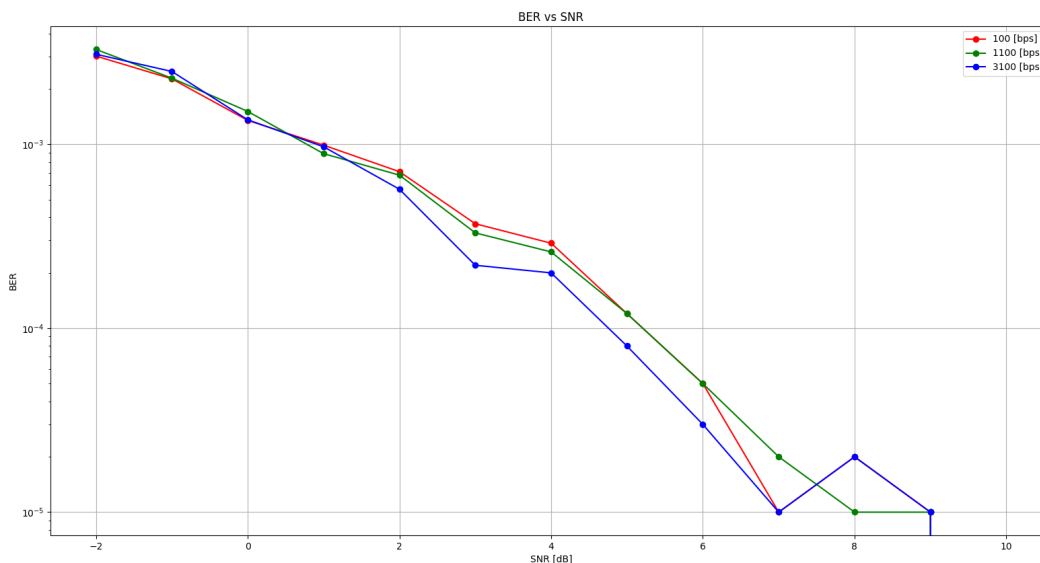


Figura 5: Gráfica de curva BER normalizada respecto a SNR para simulación realizada

#### 4.4. Preguntas propuestas para la experiencia

En esta sección se busca dar respuesta a las preguntas propuestas para esta experiencia.

##### 4.4.1. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de la modulación digital?

Una de las ventajas de la modulación digital es menos afectada por el ruido que la modulación analógica ya que debe determinar en un determinado periodo de tiempo si se está enviando un pulso que corresponda a un bit 0 o 1. Es debido a esto que su procesamiento e implementación es más fácil también. En cuanto a las desventajas destaca la necesidad de un mayor ancho de banda, sincronización muy precisa, mayor consumo energético, etc.

##### 4.4.2. ¿Cuáles son los principales usos para la modulación digital?

La modulación digital es utilizada actualmente para la transmisión de datos digitales, por ejemplo en fibras ópticas, modems, satélites, aviación, radio comunicaciones por microondas, etc.

#### **4.4.3. ¿De qué depende la tasa de errores de un sistema de comunicación digital?**

Depende de la cantidad de bits erróneos recibidos, los bits enviados pueden verse alterados por factores como el ruido e interferencias que alteren el mensaje enviado hacia el receptor. En la experiencia realizada fue posible el determinar que cuando se aumenta la velocidad de transmisión de datos (bitrate) la tasa de errores aumenta, como también la tasa de errores disminuye cuando se incrementa la SNR.

#### **4.4.4. ¿Cómo se puede mejorar la tasa de errores de un sistema de comunicación digital?**

Si bien no se puede controlar el ruido o interferencias del ambiente, utilizar FSK resulta la opción más viable ya que es la que presenta mayor inmunidad hacia perturbaciones en la amplitud provocadas por el ruido. Además de esto en el libro guía del curso se menciona “Hay otro factor que se puede utilizar para mejorar las prestaciones del sistema, el cual no es otro sino el propio esquema de codificación” (Stallings, 2004).

### **4.5. ¿Cómo afecta el ruido a la tasa de datos del sistema?**

Si bien no afecta directamente sobre la cantidad de bits enviados, en caso de que el ruido altere las tramas, estas deben ser reenviadas afectando así la cantidad de bits enviados efectivamente (sin errores).

#### **4.5.1. ¿Cómo se puede mejorar la tasa de datos de un sistema de comunicación digital?**

La forma aparente de mejorar la tasa de datos es por medio de mejoras en las prestaciones de la velocidad de transmisión de bits tanto de emisores como receptores, a diferencia de la tasa de símbolos que pueden ser mejorada mediante agrupaciones de bits.

## 5. Conclusión

La experiencia de laboratorio N°3 presento algunas dificultades, siendo la principal de estas la demodulación al aplicar el ruido, ya que no se tenía claro el procedimiento adecuado para determinar si en el tiempo de bit observado la señal emitió un 1 o 0, sin embargo este problema fue solventado por medio de la experimentación, observando que gran parte de la suma de las amplitudes superaban el valor 10 para el bit 1, mientras que la sumatoria para el bit 0 tendía a números cercanos a 0 e incluso negativos. Respecto a los objetivos se logró realizar la experiencia de laboratorio de forma completa y como conclusión se destacan los conocimientos adquiridos como la implementación de un modulador y un demodulador digital, en específico OOK, en el cual fue posible el darse cuenta las muchas formas posibles de implementar un demodulador digital y el cómo variar ciertos parámetros hacia mejorar o empeorar el demodulador, además fue posible el estudiar y observar como afectaba la SNR y el bitrate a la pérdida de información mediante la simulación de transmisión de información en un canal ruidoso, logrando determinar satisfactoriamente que sucede al aumentar o disminuir estos parámetros, esta experiencia permitió interiorizar de mejor forma los conceptos de modulación y demodulación digital enseñados en cátedra.

# Bibliografía

- Alonso, R. (2021). *Relación señal-ruido o snr en audio, ¿qué es y por qué es importante?* (<https://hardzone.es/reportajes/que-es/relacion-senal-ruido-snr-audio/>)
- Científicos, T. (2005). *Ask - desplazamiento de amplitud*. (<https://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/ask>)
- Fernández, M. (2021). *Conceptos sobre señales*. (<https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/16834/tema04.senales.pdf>)
- Gobierno de la provincia de Buenos Aires, D. g. d. c. y. e. (2009). *Sistemas de transmisión de la información*. En *Tecnologías de la información y la comunicación*. Descargado de [http://servicios.abc.gov.ar/lainstitucion/revistacomponents/revista/archivos/textos-escolares2007/TIC-P01-3P/archivosparadescargar/TIC\\_P01\\_3P\\_general.pdf](http://servicios.abc.gov.ar/lainstitucion/revistacomponents/revista/archivos/textos-escolares2007/TIC-P01-3P/archivosparadescargar/TIC_P01_3P_general.pdf)
- Moyano, J. M. D. (2005). *Ruidos e interferencias: Técnicas de reducción*. ([https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion\\_5\\_it/iec\\_4.pdf](https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_4.pdf))
- Stallings, W. (2004). *Técnicas para la codificación de señales*. En *Comunicaciones y redes de computadores*.