

Introducción a los sistemas de comunicación

Modulación y Procesamiento de Señales

Ernesto López

Pablo Zinemanas, Mauricio Ramos

{pzinemanas, mramos}@fing.edu.uy

Centro Universitario Regional Este

Sede Rocha

Tecnólogo en Telecomunicaciones

Curso 2016

Introducción a los sistemas de comunicación

- ▶ Un sistema de comunicación **transporta información** desde su **fuentes** a un **destino** distante.
- ▶ Existen muchos tipos de sistemas de comunicación, con aplicaciones distintas.
 - ▶ Es imposible estudiar todas las partes individuales que integran cada tipo de sistema.
 - ▶ Un sistema convencional incluye diversos componentes que cubren todas las áreas de la ingeniería eléctrica:
 - ▶ teoría de circuitos, electrónica, electromagnetismo, procesamiento de señales, redes de datos, microprocesadores.
- ▶ El tema se enfocará de un punto de vista general reconociendo que todos los sistemas de comunicación tienen como objetivo la **transferencia de información**.
- ▶ Se estudiarán los principios y los problemas relativos al **transporte de información en forma eléctrica**.

Información, mensajes y señales

- ▶ El concepto de **información** es vital para la comunicación, pero conlleva nociones filosóficas y semánticas que complican una definición precisa.
- ▶ Esta dificultad se evitará empleando el concepto de **mensaje**
 - ▶ **Mensaje**: manifestación física de la información tal como la produce la fuente.

Objetivo de un sistema de comunicación:

reproducir en el destino una copia aceptable del mensaje de la fuente.

- ▶ El mensaje se puede clasificar en dos tipos:
 - ▶ Mensajes analógicos
 - ▶ Mensajes digitales

Información, mensajes y señales

Mensaje analógico

- ▶ Magnitud física que varía de forma continua en el tiempo.
 - ▶ variación de la presión del aire producida al hablar.
 - ▶ intensidad de la luz en algún punto en la imagen de una televisión.
- ▶ La información esta contenida en la **forma de onda** que varía con el tiempo.
- ▶ El objetivo de un sistema de comunicación analógico es entregar en el destino la **forma de onda** con cierto grado de **fidelidad** especificado.

Mensaje digital

- ▶ Secuencia ordenada de **símbolos** elegidos a partir de un **alfabeto** de símbolos finito.
 - ▶ señal digital (forma de onda de tiempo continuo muestreada y cuantizada).
 - ▶ teclas que se presionan en un teclado de una computadora.
- ▶ La información esta contenida en los símbolos discretos.
- ▶ El objetivo de un sistema de comunicación digital es entregar en el destino los símbolos con un grado de **precisión** especificado en una **cantidad de tiempo** determinada.

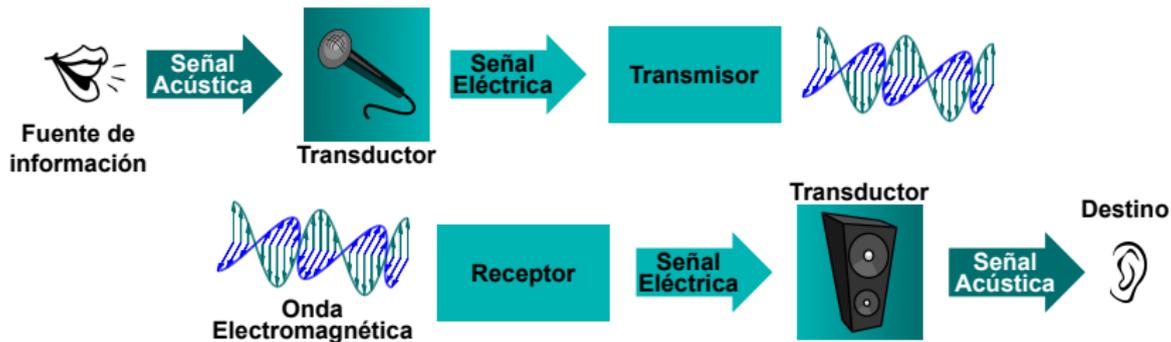
Información, mensajes y señales

Transductores y señales

- ▶ Los mensajes, ya sean analógicos o digitales, no son en general de naturaleza eléctrica.
- ▶ En consecuencia, la mayoría de los sistemas de comunicación tienen **transductores de entrada y de salida**:
 - ▶ **Transductor de entrada**: se encuentra en el origen de la comunicación y convierte al mensaje en una señal eléctrica (voltaje o corriente).
 - ▶ **Transductor de salida**: se encuentra en el destino y convierte la señal eléctrica recibida en la forma original del mensaje.
- ▶ **Ejemplo**: los transductores en un sistema de comunicación de voz son un **micrófono** en el origen y un **parlante** en el destino.

Información, mensajes y señales

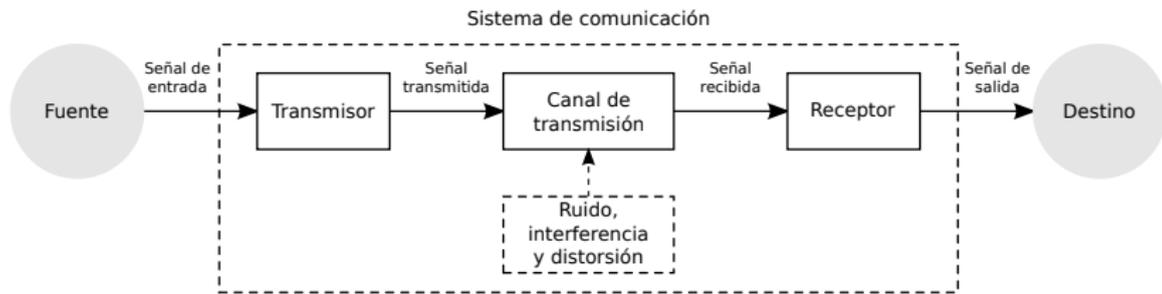
Transductores y señales



En el estudio de los sistemas de comunicación se supondrá que existen transductores adecuados y se pondrá atención en la **transmisión de las señales eléctricas**.

Elementos de un sistema de comunicación

Hay tres elementos esenciales en un sistema de comunicación: el **transmisor**, el **canal de transmisión** y el **receptor**.



- ▶ El sistema de la figura representa la comunicación de **una vía**
- ▶ La comunicación de **dos vías** requiere un transmisor y un receptor en cada extremo.

Elementos de un sistema de comunicación

- ▶ **Transmisor:** procesa la señal de entrada para **adaptarla al canal de transmisión** produciendo la señal transmitida.
 - ▶ El procesamiento puede comprender la **modulación** y la **codificación**.
- ▶ **Canal de transmisión:** es el **medio eléctrico** que **transporta** a la señal transmitida. Forma un puente entre la fuente y el destino.
 - ▶ Puede ser un par de cobre, un cable coaxial, guías de onda, un cable de fibra óptica, el aire.
 - ▶ Todo canal produce **atenuación** de la señal que viaja por el, provocando que la potencia de la señal se reduzca a medida que se incrementa la distancia.
- ▶ **Receptor:** procesa la señal de salida del canal
 - ▶ **Amplificación**, para compensar la atenuación sufrida en el canal.
 - ▶ **Demodulación** y **decodificación**, para invertir el procesamiento realizado en el transmisor.
 - ▶ **Filtrado** para eliminación de ruido e interferencias y para compensar la distorsión producida en el canal.

Elementos de un sistema de comunicación

Efecto del canal

- ▶ En el transporte de la señal desde la fuente al destino, además de atenuación, la señal sufre de **contaminación con ruido e interferencias y distorsión**.
 - ▶ Estas perturbaciones son críticas, ya que alteran la **forma de onda** de la señal.
- ▶ Si bien estas perturbaciones pueden ocurrir en cualquier parte del sistema, se asume por convención que son **producidas en el canal**, y el transmisor y el receptor son ideales.

Elementos de un sistema de comunicación

Efecto del canal

▶ Distorsión:

- ▶ El canal puede modelarse como un **filtro** que altera la señal.
- ▶ Idealmente, el canal debería tener **respuesta en frecuencia plana**, pero en la práctica no es así.
- ▶ Si el canal puede modelarse como un **sistema lineal**, es posible compensar la distorsión filtrando con el filtro inverso.

▶ Interferencia:

- ▶ Es la contaminación de la señal por **señales externas provenientes de fuentes humanas**: otros transmisores, sistemas eléctricos de potencia.
- ▶ Las interferencias pueden eliminarse mediante el filtrado apropiado si ocupan una banda de frecuencias que no se solapa con el espectro de la señal deseada.

▶ Ruido:

- ▶ Se refiere como ruido a las **señales aleatorias** que contaminan la señal y son producidas por **fuentes naturales**.
- ▶ Mediante el filtrado es posible atenuar el efecto del ruido, pero siempre queda cierta cantidad que no es posible eliminar.
- ▶ Constituye una de las limitaciones fundamentales del sistema.

Limitaciones de los sistemas de comunicación

- ▶ Las leyes naturales relacionadas con la tarea de la transmisión de señales impone **limitaciones físicas** en los sistemas de comunicación y dictan lo que se puede llevar a cabo y lo que no.
- ▶ Las limitaciones fundamentales en la transmisión de señales eléctricas son:
 - ▶ ancho de banda de transmisión
 - ▶ ruido

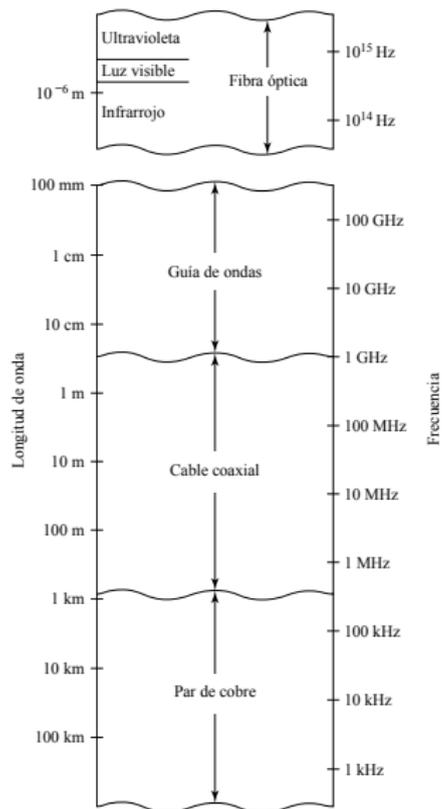
Limitaciones de los sistemas de comunicación

Ancho de banda de transmisión

- ▶ Indica la habilidad de un sistema para seguir las variaciones de una señal.
- ▶ Todo sistema de comunicación tiene un **ancho de banda finito** B que limita las frecuencias de las señales que se transmiten.
 - ▶ Cuanto mayor es el ancho de banda es posible transmitir señales que varían mas rápidamente en el tiempo.
- ▶ **Ancho de banda de señales:** es una medida de la velocidad de variación de las señales
 - ▶ Señal de televisión: $B \approx 5$ a 8 MHz.
 - ▶ Señal de voz: $B \approx 4$ kHz.
 - ▶ Para transmitir r símbolos por segundo de una señal digital se requiere que $B \geq r/2$.
- ▶ La comunicación en **tiempo real** requiere un ancho de banda de transmisión suficiente para acomodar el ancho de banda de la señal.
- ▶ Sin restricción de tiempo real, el ancho de banda impone la **velocidad de transmisión de mensajes digitales**.

Limitaciones de los sistemas de comunicación

Ancho de banda de transmisión



Frecuencia de operación de algunos canales alámbricos.

Imagen extraída y modificada de [?]

Limitaciones de los sistemas de comunicación

Ruido

- ▶ La contaminación con ruido es **inevitable** en todo sistema de comunicación (ej.: ruido térmico).
- ▶ Una medida de desempeño de los sistemas de comunicación es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido (SNR o S/N) en la salida del receptor.
- ▶ El ruido **degrada fidelidad** en las comunicaciones analógicas y produce **errores** en las comunicaciones digitales.
 - ▶ La medida de desempeño de un sistema digital es la probabilidad de error de bits (P_e) o la tasa de error de bits (BER , Bit Error Rate).
- ▶ El ruido se hace problemático en los enlaces de transmisión de larga distancia, donde la atenuación puede hacer que la potencia de la señal caiga debajo del nivel de ruido.

Limitaciones de los sistemas de comunicación

- ▶ ¿Es posible inventar un sistema de comunicación digital sin errores en los bits aún cuando el canal introduce ruido?
- ▶ Esta pregunta fue contestada por Claude Shannon en 1948: la respuesta es **afirmativa**, sujeto a que se cumplen ciertas hipótesis.
- ▶ Shannon demostró que la capacidad C de un canal de transmisión se puede calcular como (**ley de Hartley-Shannon**)

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bits/s}$$

- ▶ B es el ancho de banda del canal en Hz
- ▶ S/N es la relación señal a ruido en watts/watts

- ▶ Si la velocidad de transferencia de información r (bits/s) cumple que

$$r < C,$$

la **probabilidad de error de bit tiende a cero**.

- ▶ De este modo se establece una **meta de rendimiento teórico** que hay que intentar lograr con sistemas de comunicación prácticos.

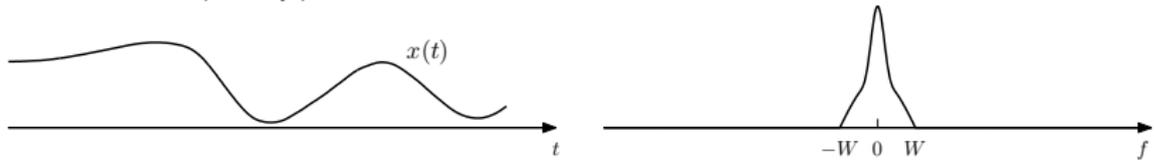
Procesamiento en el transmisor

- ▶ Previo a la transmisión, el transmisor realiza cierto procesamiento a la señal a transmitir para hacer la comunicación mas **eficiente** y **confiable**.
- ▶ Estas operaciones son la **modulación** y la **codificación**.

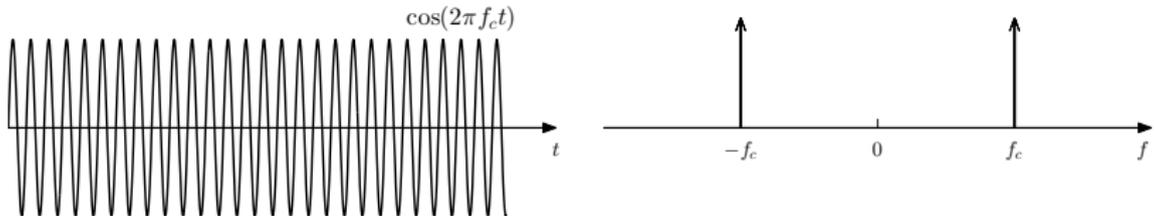
Procesamiento en el transmisor

Ilustración de la modulación AM

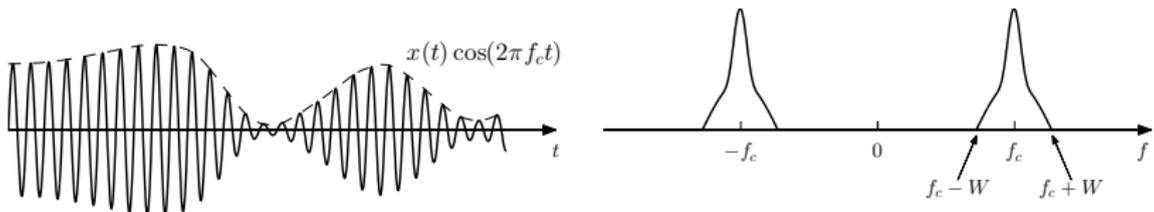
Señal modulante (mensaje)



Portadora sinusoidal



Señal modulada



Procesamiento en el transmisor

Modulación

- ▶ La modulación es una operación realizada en el transmisor cuyo principal objetivo es la **adaptación de la señal al canal de transmisión**.
- ▶ La modulación comprende dos formas de onda:
 - ▶ la **señal moduladora**, que es el mensaje que se quiere transmitir
 - ▶ la **onda portadora**, que depende de la aplicación particular. En muchas aplicaciones se trata de una onda sinusoidal.
- ▶ Cuando la portadora es una onda sinusoidal, la modulación es referida como **modulación de onda continua**.
- ▶ Ejemplos de modulación de onda continua son:
 - ▶ **modulación de amplitud** (*AM*, amplitude modulation)
 - ▶ **modulación en frecuencia** (*FM*, frequency modulation)
- ▶ El proceso debe ser **reversible** de forma de poder recuperar el mensaje por medio de la operación complementaria de **demodulación** en el **receptor**.

Procesamiento en el transmisor

Modulación

- ▶ En la transmisión a larga distancia, normalmente se emplea una portadora de frecuencia mucho mas alta que la mayor frecuencia del mensaje que se transmite.
- ▶ Ejemplo:
 - ▶ En radiodifusión AM, el espectro del mensaje cubre normalmente entre 100 Hz y 5 kHz (audio).
 - ▶ Si la frecuencia de la portadora es 800 kHz, el espectro de la señal modulada cubre de 795 a 805 kHz.

Procesamiento en el transmisor

Beneficios y aplicaciones de la modulación

- ▶ **Transmisión eficiente:** la eficiencia de cualquier método de transmisión depende de la frecuencia de la señal que se transmite.
 - ▶ Mediante la modulación es posible controlar las frecuencias de la señal que se transmite.
 - ▶ Ejemplo: la transmisión por **línea vista** requiere una antena de dimensión inversamente proporcional a la frecuencia.
 - ▶ una señal de audio no modulada contiene frecuencias menores a 100 Hz, lo que exigiría una antena de 300 km de longitud.
 - ▶ al modular la señal con una portadora de 100 MHz, como en radiodifusión FM, permite un tamaño de antena del orden de 1 metro.
- ▶ **Reducción de ruido e interferencia:** algunos tipos de modulación, como la modulación FM, tienen la propiedad de reducir el ruido y la interferencia.
 - ▶ El costo es un incremento del ancho de banda de la señal transmitida: **reducción del ruido de banda ancha**.
 - ▶ Hay un compromiso entre **la potencia de transmisión y el ancho de banda de transmisión**. El incremento del ancho de banda de transmisión permite el ahorro de potencia de transmisión.

Procesamiento en el transmisor

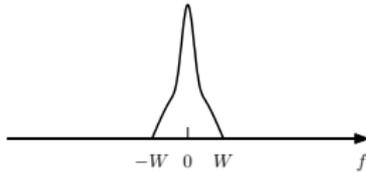
Beneficios y aplicaciones de la modulación

- ▶ **Modulación para multiplexación:** La multiplexación es el proceso de combinar varias señales para poder transmitir las simultáneamente por un mismo canal.
 - ▶ La **multiplexación por división de frecuencia** (*FDM*, frequency division multiplexing) usa la modulación de onda continua para colocar cada señal en **bandas de frecuencia distintas**, que luego pueden ser separadas mediante el filtrado pasabanda.
 - ▶ Ejemplos de uso de multiplexación son la radiodifusión AM y FM y la TV aérea y por cable.

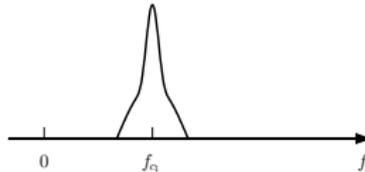
Procesamiento en el transmisor

Ilustración de multiplexación por división de frecuencia

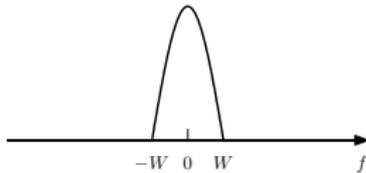
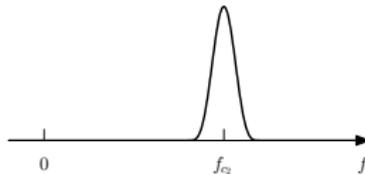
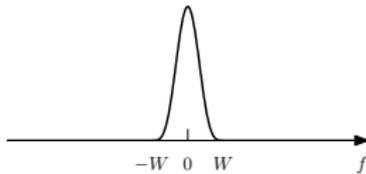
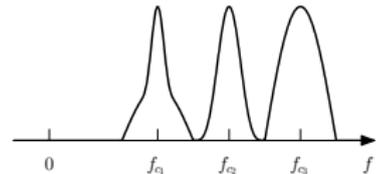
Señales en banda base



Señales moduladas con portadoras de distinta frecuencia



Suma de las señales moduladas



Procesamiento en el transmisor

Asignación del espectro electromagnético mediante modulación

Imagen extraída de la Comisión Nacional de Telecomunicaciones de Venezuela

<http://www.conatel.gob.ve/espectro-radioelectrico/>

Propagación de ondas electromagnéticas en el aire

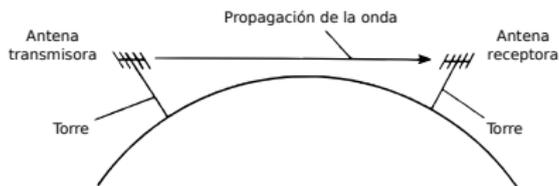
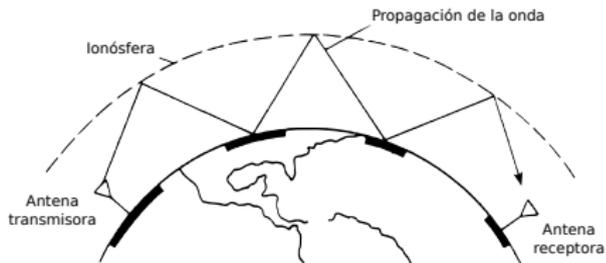
- ▶ Las características de la propagación de ondas electromagnéticas en el aire dependen de la frecuencia.
- ▶ El espectro electromagnético puede dividirse en tres bandas. En cada una predomina un modo de propagación distinto: onda terrestre, onda celeste y línea vista.
- ▶ **Onda terrestre:**
 - ▶ Es el modo predominante para frecuencias **debajo de los 2 MHz** (ejemplo: radiodifusión AM).
 - ▶ En este modo de propagación, la onda tiende a seguir el contorno de la tierra, y la señal se propaga mas allá del horizonte visual.
- ▶ **Ondas celeste:**
 - ▶ Modo predominante en el intervalo de frecuencia de **2 a 30 MHz** (ejemplo: radioaficionados, radiodifusión de onda corta, comunicaciones marinas y aéreas).
 - ▶ La onda se refleja en la ionósfera y en la tierra, obteniendo cobertura de larga distancia.
- ▶ **Línea vista:**
 - ▶ Modo predominante en frecuencias **sobre los 30 MHz** (ejemplos: FM, TV)
 - ▶ Las antenas tienen que instalarse en torres altas de modo que la antena receptora vea a la transmisora.

Propagación de ondas electromagnéticas en el aire

Propagación de onda terrestre
(debajo de los 2 MHz)



Propagación de onda celeste
(entre 2 y 30 MHz)



Propagación por línea vista
(sobre los 30 MHz)

Procesamiento en el transmisor

Codificación

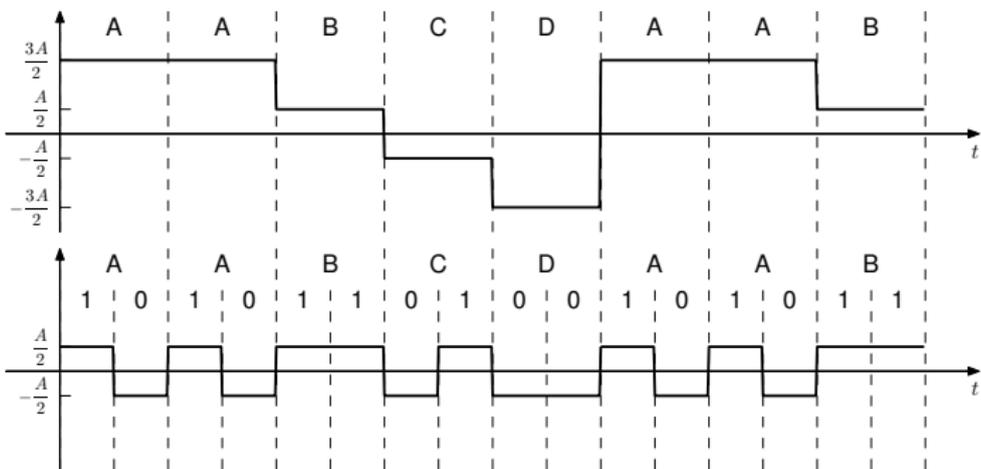
- ▶ La codificación es una operación de procesamiento de símbolos que se realiza en el transmisor para mejorar la **confiabilidad de la transmisión** cuando la información es **digital**.
- ▶ La operación de codificación **transforma una secuencia de símbolos en una nueva secuencia de símbolos** con dos objetivos principales:
 - ▶ Representar los datos digitales de forma eficiente para transmitir la menor tasa de bits posible: **Codificación de fuente**.
 - ▶ Agregar redundancia para corrección y detección de errores en la recepción: **Codificación de canal**
- ▶ En el receptor, la **decodificación** convierte la secuencia codificada en el mensaje original.
- ▶ Se considera una fuente de información digital que usa un alfabeto de $M > 2$ símbolos distintos. Hay al menos un par de alternativas:
 1. Transmitir una señal con M niveles distintos de voltaje, donde cada nivel representa un símbolo.
 2. Codificar cada símbolo con K dígitos binarios (con $2^K \geq M$) y transmitir una señal con solo dos niveles de voltaje distintos.

Procesamiento en el transmisor

Codificación: ejemplo

- ▶ Se considera una fuente de información digital que usa un alfabeto de $M = 4$ símbolos distintos: **A, B, C y D**.
- ▶ La fuente genera un símbolo cada T segundos o equivalentemente, a una cadencia de $r = 1/T$ símbolos por segundo.

Símbolo	Voltaje	Palabra binaria
A	$3A/4$	10
B	$A/2$	11
C	$-A/2$	01
D	$-3A/4$	00



Procesamiento en el transmisor

Codificación

- ▶ Ventajas y desventajas de la **codificación binaria** de la fuente M -aria:

Desventajas

- ▶ Se producen r símbolos M -arios por segundo, mientras que se producen Kr símbolos binarios por segundo. **Incrementa K veces el ancho de banda de transmisión.**

Ventajas

- ▶ Se necesitan circuitos menos complicados para manejar la señal binaria.
- ▶ El ruido contaminante tiene menor efecto sobre la señal binaria de la misma potencia que la señal M -aria.

Procesamiento en el transmisor

Codificación de fuente

- ▶ Las técnicas de codificación de fuente aprovechan el conocimiento estadístico de la fuente para **comprimir** los datos a transmitir.
- ▶ El objetivo de la codificación de fuente es **eliminar redundancia**.
- ▶ **Ejemplo:**

Símbolo	Probabilidad de ocurrencia	Palabra binaria	Código Huffman
A	0.5	10	0
B	0.25	11	10
C	0.125	01	110
D	0.125	00	111

- ▶ El largo de palabra por símbolo promedio es

$$L = E(l_k) = \sum_k p_k l_k.$$

- ▶ En el caso de codificar cada símbolo con 2 bits, $L = 2$ bits por símbolo.
- ▶ En el caso de usar el código de Huffman, $L = 1.75$ bits por símbolo.

Procesamiento en el transmisor

Codificación de canal

- ▶ La codificación de canal consiste en **introducir redundancia** de forma de detectar y corregir posibles errores producidos por un canal ruidoso.
- ▶ Se realiza agregando dígitos de verificación a cada palabra. Un ejemplo es el **código de Hamming**
- ▶ **Ejemplo:** bit de paridad

Símbolo	Palabra binaria	Bit de paridad
A	10	101
B	11	110
C	01	011
D	00	000

- ▶ Se agrega un bit a cada palabra de forma que el número de unos sea par (o impar).
- ▶ La codificación de canal aumenta el ancho de banda de transmisión y la complejidad del hardware, pero permite la comunicación casi libre de errores a pesar de una baja relación señal a ruido.

Referencias I



Carlson, A. B. and Crilly, P. (2009).
Communication Systems, chapter 1.
McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 5th edition.



Couch II, L. W. (1996).
Digital and Analog Communication Systems.
Prentice Hall, 5th edition.



Proakis, J. G. and Salehi, M. (2001).
Communication Systems Engineering.
Prentice Hall, 2nd edition.