

Presentación del curso

Modulación y Procesamiento de Señales

Tecnólogo en Telecomunicaciones
Centro Universitario Regional Este
Sede Rocha

Curso 2023

Materiales e Instancias del curso

- ▶ **Teórico** (Andrés Seré <asere@fing.edu.uy>)
 - ▶ Clases: Martes de 13:15 a 17:45
 - ▶ Diapositivas
- ▶ **Práctico** (Andrés Arobba)
 - ▶ Clases: Miércoles de 17:00 a 19:00
 - ▶ Prácticos (hojas de ejercicios)
- ▶ **Teórico-práctico** (Andrés Seré)
 - ▶ Laboratorios/notebooks: entregas el viernes siguiente al teórico correspondiente
 - ▶ Bibliografía
- ▶ **Consultas e intercambio** (Andrés Seré y Andrés Arobba)
 - ▶ EVA del curso

Introducción

Modulación y procesamiento de señales

1. Procesamiento de señales

- ▶ Señales y sistemas en tiempo discreto
- ▶ Muestreo de señales analógicas

2. Sistemas de comunicación y transmisión de señales

- ▶ Señales aleatorias, modelos de ruido
- ▶ Transmisión de señales digitales (PCM, bandabase, pasabanda)

Bibliografía

Procesamiento de señales

Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer (2000).

Tratamiento de señales en tiempo discreto

Prentice Hall, 2da edición.

Sistemas de comunicación

Bruce Carlson, Paul. B. Crilly (2002).

Sistemas de Comunicación

McGraw-Hill, 4ta edición.

Bibliografía complementaria: [Smith, 1997, Oppenheim et al., 1996, Couch II, 1996]

Señales

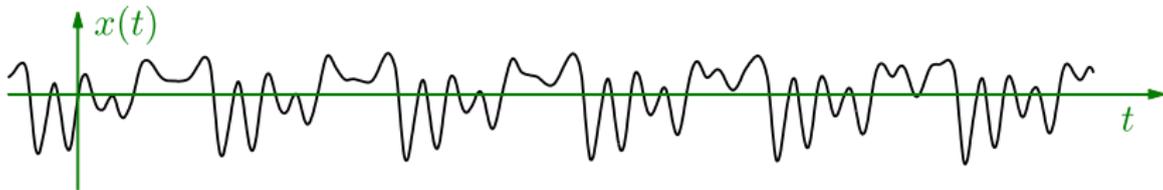
Señal

Función de una o varias variables independientes que contiene algún tipo de información.

Ejemplo: señal de voz

Presión de aire en función del tiempo en cierto punto del espacio (*señal acústica*).

Tensión eléctrica en el cable del micrófono en función del tiempo (*señal eléctrica*).



Características

- ▶ **Señal de una dimensión.** La señal es función de una única variable independiente: el tiempo (t).
- ▶ **Señal en tiempo continuo o analógica.** La variable independiente es continua, es decir, puede tomar cualquier valor real arbitrario.

Señales

Ejemplo de señal multidimensional: imagen



Jean-Baptiste Joseph Fourier
1768-1830

- ▶ Representación visual en dos dimensiones que manifiesta la apariencia visual de un objeto real o imaginario.
- ▶ La señal es en este caso

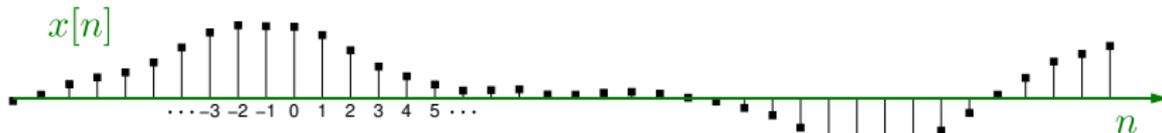
Luminosidad(*horiz, vert*)

- ▶ **Señal de dos dimensiones.** La señal es función de dos variables espaciales: la posición en el eje horizontal y la posición en el eje vertical.
- ▶ Una imagen es intrínsecamente **analógica**, porque las variables independientes espaciales son continuas.

Señales

Señal en tiempo discreto

La señal es función de una o varias variables independientes, pero las variables independientes solo toman valores enteros.



Señal en tiempo discreto de una dimensión

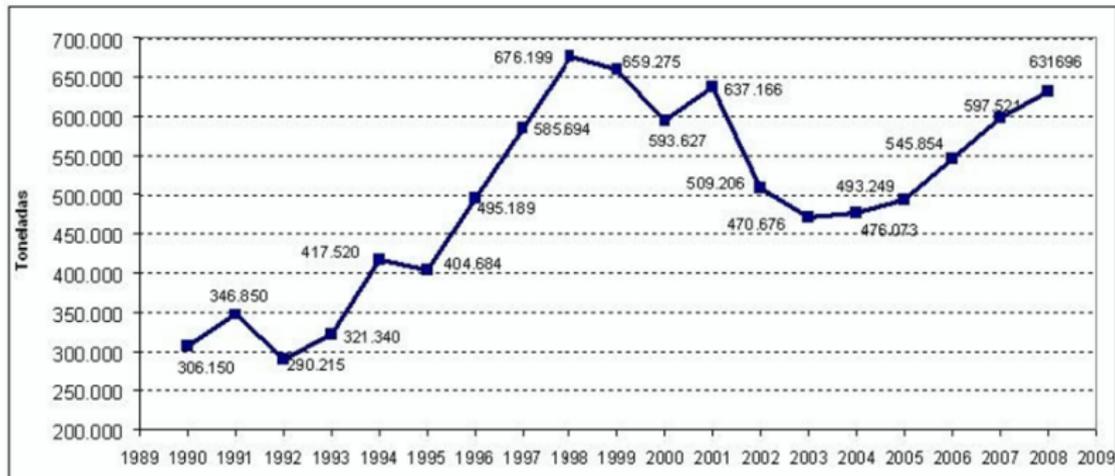
- ▶ Análogamente al caso en tiempo continuo, la **señal discreta** puede ser multidimensional

señal en tiempo discreto de dos dimensiones: $x[n, m]$

- ▶ Las señales en tiempo discreto aparecen en casi todas las áreas de la ciencia (ejemplos: datos climáticos, series temporales en economía)

Señales

Ejemplo: cantidad de basura recolectada en una ciudad.



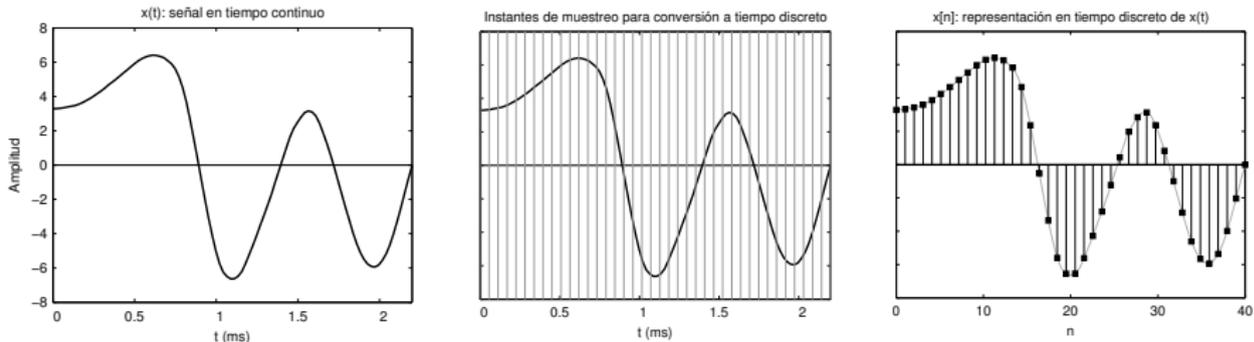
En la figura se visualizan las toneladas estimadas ingresadas al SDFR (IMM) entre los años 1990 y 2008.

Fuente: SDFR, División Limpieza, IMM

Señales

Señal en tiempo discreto

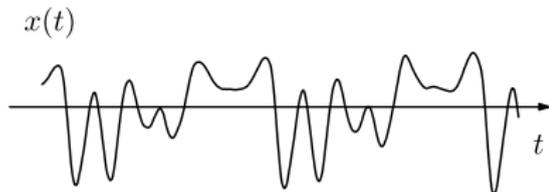
- ▶ Existen señales que son intrínsecamente de tiempo discreto.
- ▶ También es posible construir señales en tiempo discreto a partir del **muestreo** de señales en tiempo continuo.



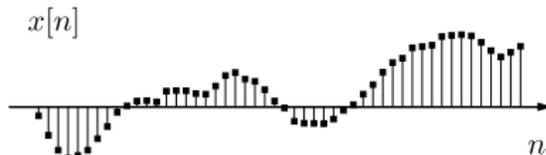
- ▶ ¿Se pierde información? ¿Es posible reconstruir la señal analógica original a partir de la señal en tiempo discreto?
- ▶ **Teorema de muestreo:** se puede demostrar que bajo ciertas condiciones (las muestras se toman suficientemente juntas) no se pierde información.

Procesamiento de señales

Señal en tiempo continuo



Señal en tiempo discreto



Procesamiento de señales

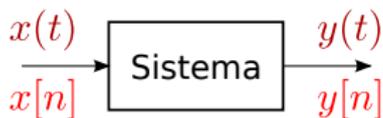
- ▶ El procesamiento de señales es el conjunto de técnicas y algoritmos para manipular señales.

Atenuación de interferencias	Eliminación de ruido u otras señales interferentes en transmisión
Resaltado de características de interés y mejora de la calidad	Resaltado de imágenes o señales de voz deterioradas
Extracción de información de alto nivel	Reconocimiento de voz, identificación del hablante, visión artificial
Compresión de datos para almacenamiento o transmisión	Compresión de audio (mp3), compresión de imágenes (jpg)
Predicción de valores futuros de la señal	Predicción climática, sísmica, de variables económicas

Procesamiento de señales

Sistemas

- ▶ Para procesar señales se utilizan **sistemas**.
- ▶ Un sistema toma una señal a la entrada y la modifica mediante una operación matemática resultando en una señal de salida.



- ▶ Sistema en tiempo continuo
- ▶ Sistema en tiempo discreto

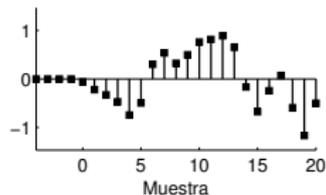
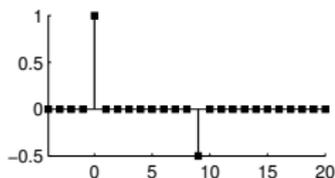
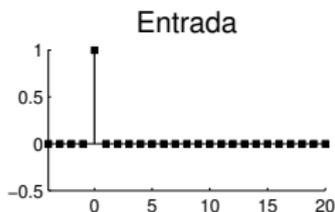
- ▶ Los sistemas son difíciles de tratar porque se definen de forma muy amplia y general.
- ▶ Clasificación de sistemas
 - ▶ Lineal
 - ▶ Invariante en el tiempo
 - ▶ No lineal
 - ▶ Variante en el tiempo
- ▶ En el curso vamos a estudiar un tipo particular de sistemas que poseen gran utilidad práctica y tienen características que facilitan el análisis:

Sistemas lineales e invariantes en el tiempo (SLIT)

Procesamiento de señales

Respuesta al impulso de sistema lineal invariante en el tiempo

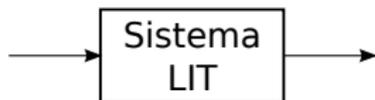
Principio de superposición: conociendo la respuesta al impulso, se puede calcular la respuesta del sistema a cualquier entrada



Si la entrada es un impulso $\delta[n]$, la salida es la respuesta al impulso $h[n]$.

$\delta[n]$

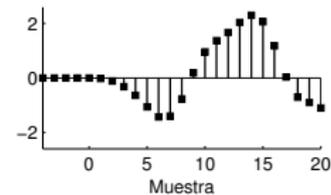
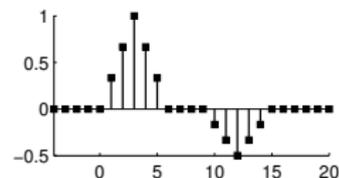
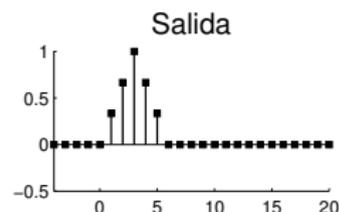
$h[n]$



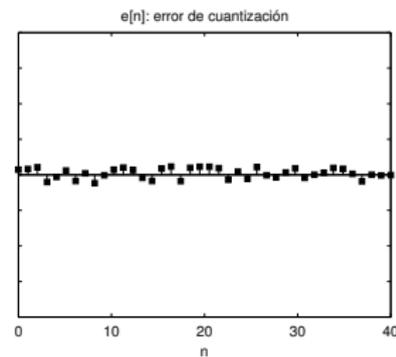
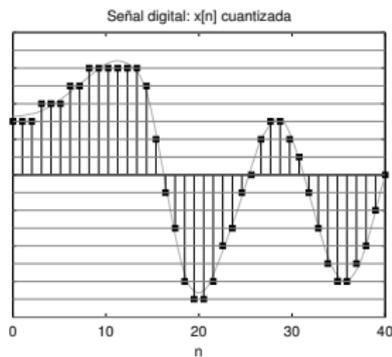
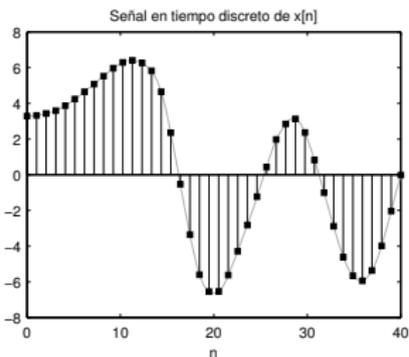
$x[n]$

$x[n]*h[n]$

Si la entrada es $x[n]$ arbitraria, la salida es la convolución entre $x[n]$ y $h[n]$.



Señales digitales



n	$x[n]$	$\hat{x}[n]$	Representación binaria (4 bits)	$e[n] = x[n] - \hat{x}[n]$
0	3.28582763671875 ...	3	0011	0.28582763671875 ...
1	3.32600252072388 ...	3	0011	0.32600252072388 ...
2	3.42941229539536 ...	3	0011	0.42941229539536 ...
3	3.59084930367177 ...	4	0100	-0.40915069632823 ...
4	3.87660143251529 ...	4	0100	-0.12339856748471 ...
5	4.23978288513508 ...	4	0100	0.23978288513508 ...
6	4.65752021008642 ...	5	0101	-0.34247978991358 ...
7	5.08101069504742 ...	5	0101	0.08101069504742 ...
8	5.52344033730461 ...	6	0110	-0.47655966269539 ...
9	5.97233525658709 ...	6	0110	-0.02766474341291 ...

Señales digitales

- ▶ Las muestras de la señal en tiempo discreto pueden tomar cualquier valor real. En el ejemplo, toman valores en el intervalo $[-8, 8]$.
- ▶ En una computadora, solo es posible almacenar números con precisión finita.
 - ▶ El rango dinámico de la señal se divide en M niveles ($M = 16$ en el ejemplo).
 - ▶ Cada muestra se aproxima al nivel más cercano.
 - ▶ A cada nivel se le asigna un código binario.
- ▶ Este proceso para obtener una señal digital se denomina **cuantización**.
- ▶ Mediante la cuantización se convierte la variable dependiente (por ejemplo, voltaje) de continua a discreta.
- ▶ El proceso de cuantización introduce un error inevitable denominado **ruido de cuantización**.

Código complemento a 2

Decimal	Código binario
7	0111
6	0110
5	0101
4	0100
3	0011
2	0010
1	0001
0	0000
-1	1111
-2	1110
-3	1101
-4	1100
-5	1011
-6	1010
-7	1001
-8	1000

Señales digitales

Procesamiento de señales digitales

- ▶ Muchas señales son de naturaleza analógica (audio, imágenes).
- ▶ Es conveniente trabajar con señales digitales, incluso cuando la conversión al dominio digital sea mas costoso que el procesamiento analógico que se desea realizar.
 - ▶ gran potencia y flexibilidad de algoritmos que procesan señales digitales
 - ▶ posibilidad de incluir códigos de detección y corrección de errores
 - ▶ posibilidad de comprimir los datos
 - ▶ fidelidad en la réplica de la información digital
- ▶ El esquema para el procesamiento digital de señales analógicas es el siguiente:



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.
 - ▶ 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.
 - ▶ Es imposible estudiar todas las partes individuales que integran cada tipo de sistema.
- ▶ 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.
- ▶ El mensaje se puede clasificar en dos tipos:
 - ▶ Mensajes analógicos
 - ▶ variación de la presión del aire producida al hablar.
 - ▶ intensidad de la luz en algún punto en la imagen de una televisión.
 - ▶ Mensajes digitales
 - ▶ teclas que se presionan en un teclado de una computadora.
 - ▶ lecturas de la temperatura cada hora.

Objetivo de un sistema de comunicación:
reproducir en el destino una copia **aceptable** del mensaje de la fuente.

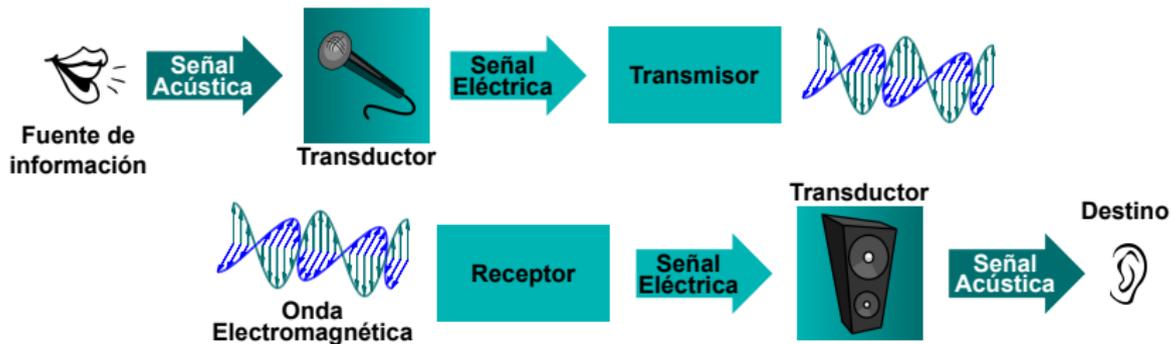
Información, mensajes y señales

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

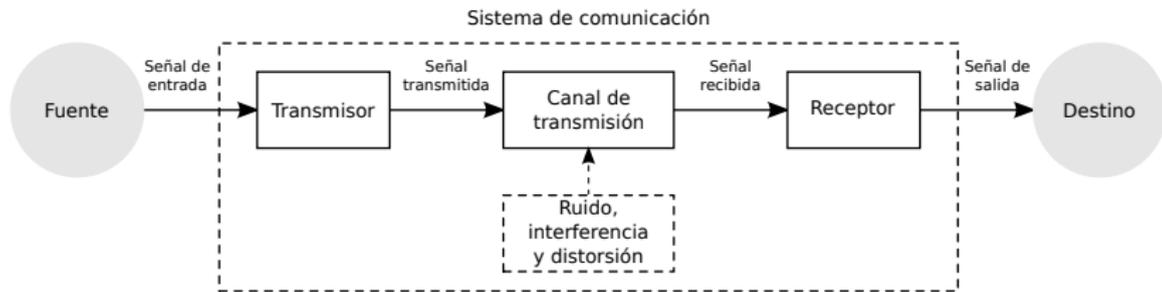
Transductores y señales



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.
 - ▶ **Filtrado** para eliminación de ruido e interferencias y para compensar la distorsión producida en el canal.
 - ▶ **Demodulación** y **decodificación**, para invertir el procesamiento realizado en el transmisor.

Elementos de un sistema de comunicación

Efecto del canal

- ▶ **Distorsión:**
 - ▶ El canal puede modelarse como un **sistema** que altera la señal.
 - ▶ Si puede aproximarse a un **sistema lineal**, es posible compensar la distorsión procesando la señal recibida con el sistema inverso.
- ▶ **Interferencia:**
 - ▶ Es la contaminación de la señal por **señales externas provenientes de fuentes humanas**: otros transmisores, sistemas eléctricos de potencia.
 - ▶ Las interferencias pueden en ocasiones eliminarse mediante un procesamiento adecuado.
- ▶ **Ruido:**
 - ▶ Se refiere como ruido a las **señales aleatorias** que contaminan la señal y son producidas por **fuentes naturales**.
 - ▶ Mediante el procesamiento de la señal recibida es posible atenuar el efecto del ruido, pero siempre queda cierta cantidad que no es posible eliminar.
 - ▶ Constituye una de las limitaciones fundamentales de los sistemas de comunicación.

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.
- ▶ 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

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 el 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.

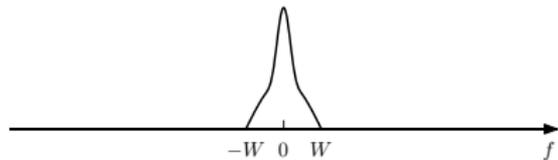
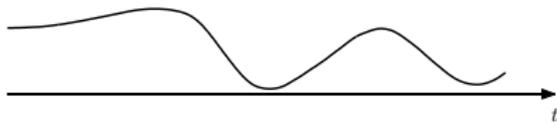
Procesamiento en el transmisor

- ▶ 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**.

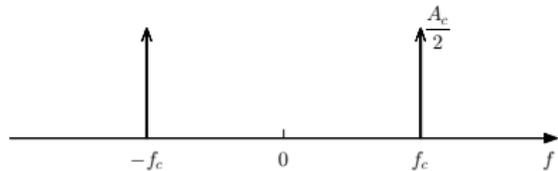
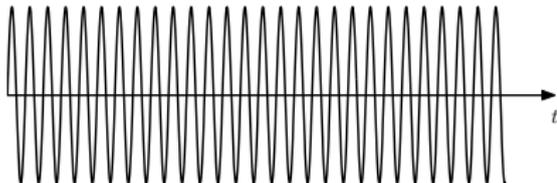
Procesamiento en el transmisor

Ilustración de la modulación AM

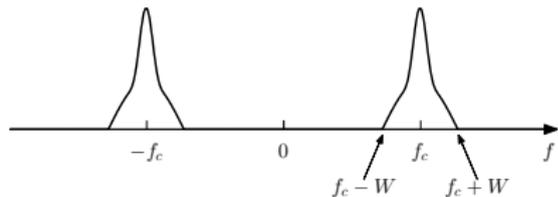
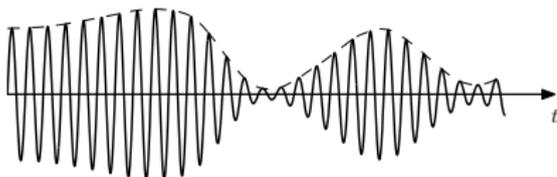
Señal modulante (mensaje)



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**.
- ▶ El proceso debe ser **reversible** de forma de poder recuperar el mensaje por medio de la operación complementaria de **demodulación**.
- ▶ Ejemplos de modulación son:
 - ▶ **modulación de amplitud** (*AM*, amplitude modulation)
 - ▶ **modulación en frecuencia** (*FM*, frequency modulation)

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

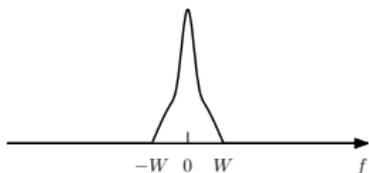
Beneficios y aplicaciones de la modulación

- ▶ **Modulación para multiplexación:** La multiplexación es el proceso de combinar varias señales para poder transmitir las simultáneamente por el 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.

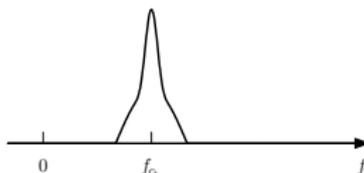
Procesamiento en el transmisor

Ilustración de multiplexación por división de frecuencia

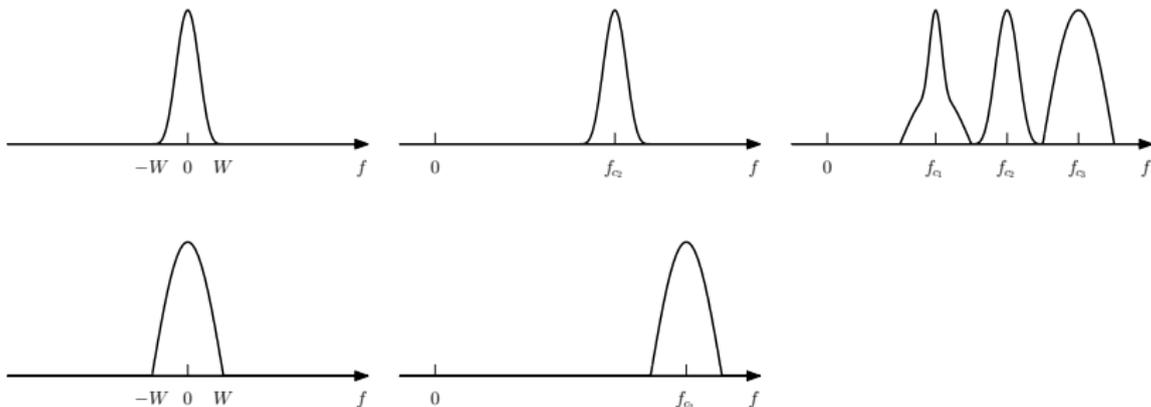
Señales en banda base



Señales moduladas con portadoras de distinta frecuencia



Suma de las señales moduladas



Procesamiento en el transmisor

Asignación del espectro electromagnético mediante modulación

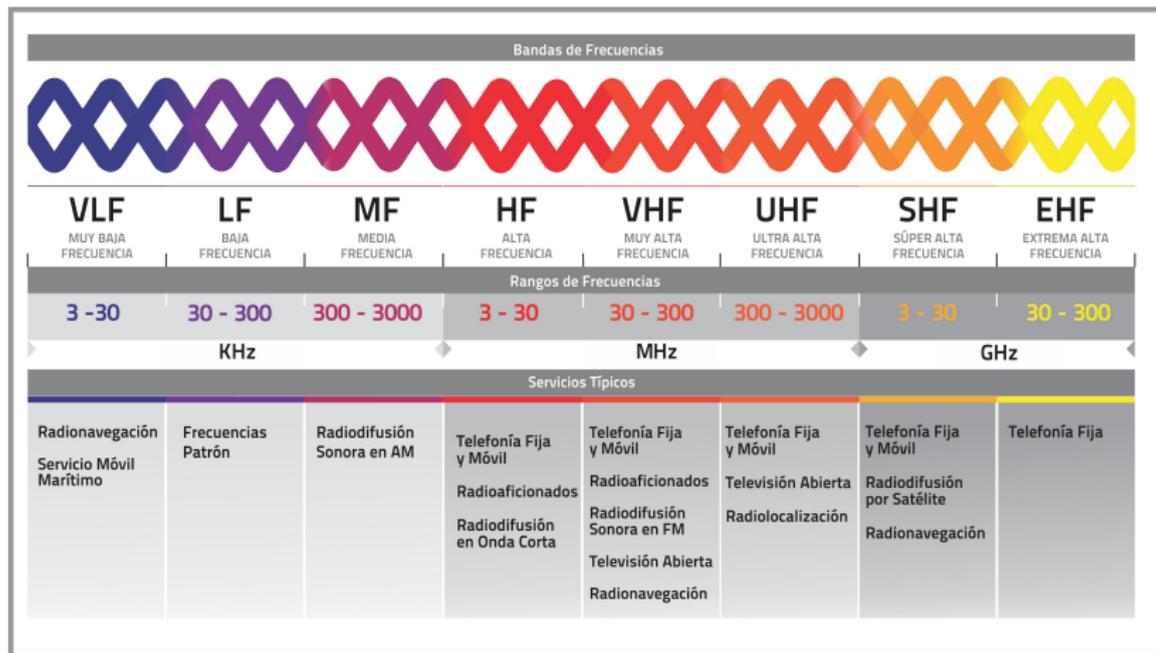


Imagen extraída de la Comisión Nacional de Telecomunicaciones de Venezuela

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

Referencias I

-  Carlson, A. B. and Crilly, P. (2009).
Communication Systems.
McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 5th edition.
-  Couch II, L. W. (1996).
Digital and Analog Communication Systems.
Prentice Hall, 5th edition.
-  Oppenheim, A. V. and Schafer, R. W. (2009).
Discrete-Time Signal Processing.
Prentice Hall, 3rd edition.
-  Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., and Hamid, S. (1996).
Signals and Systems.
Prentice Hall, 2nd edition.
-  Smith, S. W. (1997).
The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing.
California Technical Pub., 1st edition.