

3

SEÑALES DIGITALES



Objetivo

- Explicar por qué las señales digitales se consideran señales analógicas compuestas y describir las técnicas utilizadas en su transmisión.

Manual de clases

Última modificación:
6 de marzo de 2023

Tema 3 de
TRANSMISIÓN DE DATOS
Edison Coimbra G.

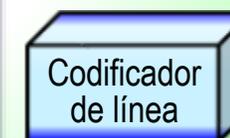
1. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES DIGITALES

SEÑALES DIGITALES

Datos analógicos y digitales

(Forouzan, 2020)

- **El mundo físico** es fundamentalmente analógico. Las magnitudes físicas (datos) que sirven para representar fenómenos naturales son analógicas, por ejemplo: voz, música, imágenes, temperatura, radiación, humedad. Los datos pueden ser analógicos o digitales.
- **Ejemplo 1.** El término **datos analógicos** se refiere a la información que es continua. Un reloj analógico que tiene manecillas de hora, minuterio y segundero da información de forma continua; los movimientos de las manecillas son continuos.
- **Ejemplo 2.** El término **datos digitales** se refiere a la información que tiene valores discretos. Un reloj digital que informa de las horas y los minutos cambiará repentinamente de 8:11 a 8:12.
- **Los datos analógicos**, como los sonidos de la voz humana toman valores continuos. Cuando alguien habla, se crea una onda analógica en el aire.
 - ☒ Esta puede ser capturada por un micrófono (transductor) y convertida en una **señal analógica**.
 - ☒ O **muestreada** y convertida en una **señal digital**, mediante la modulación PCM.
- **Los datos digitales** toman valores discretos. Por ejemplo, los datos se almacenan en la memoria de un PC en forma de "1"s y "0"s.
 - ☒ Pueden ser convertidos en una **señal digital**.
 - ☒ O **convertidos** en una **señal analógica**, mediante la modulación digital, para su transmisión a través del un medio.



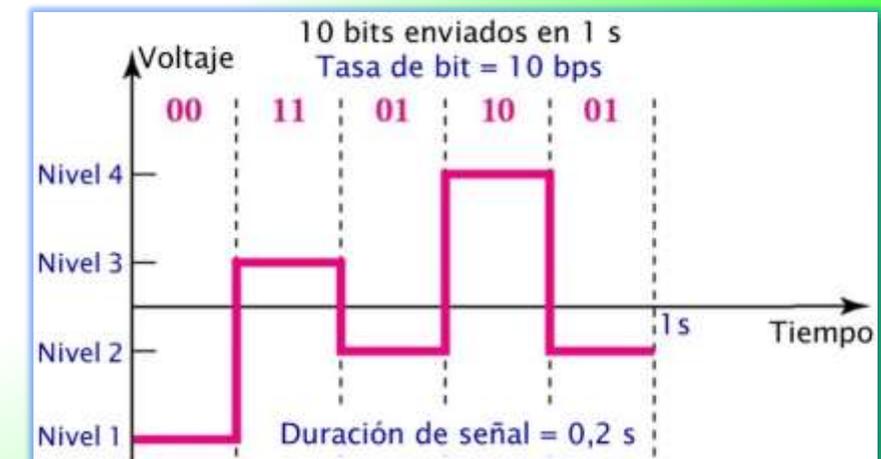
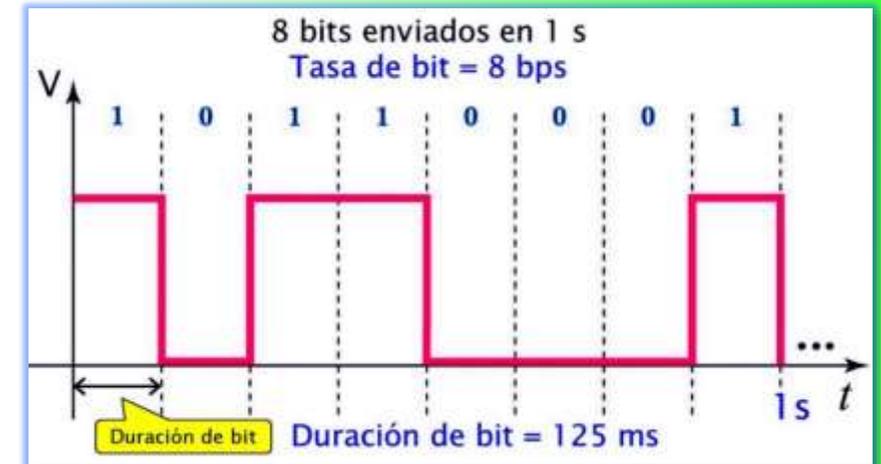
Características de las señales digitales

SEÑALES DIGITALES

Conversión de datos en señal digital

(Forouzan, 2020)

- **Además de representarse** mediante una señal analógica, la información también puede ser representada por una señal digital.
- **Por ejemplo**, un 1 puede ser codificado como un voltaje positivo y un 0 como voltaje cero, es decir se tienen dos niveles, 1 bit por nivel.
- **Una señal digital** puede tener más de dos niveles. En este caso, se puede enviar más de 1 bit para cada nivel. En el ejemplo de la figura se muestra una señal con cuatro niveles, 2 bits por nivel.
- **En general**, si una señal tiene L niveles, cada nivel necesita $\log_2 L$ bits para ser representada.
 - ► **Ejemplo 3.** Una señal digital tiene 8 niveles. ¿Cuántos bits se necesitan por nivel? **3 bits**
 - ► **Ejemplo 4.** Una señal digital tiene 9 niveles. ¿Cuántos bits se necesitan por nivel? **4 bits**



Características de las señales digitales

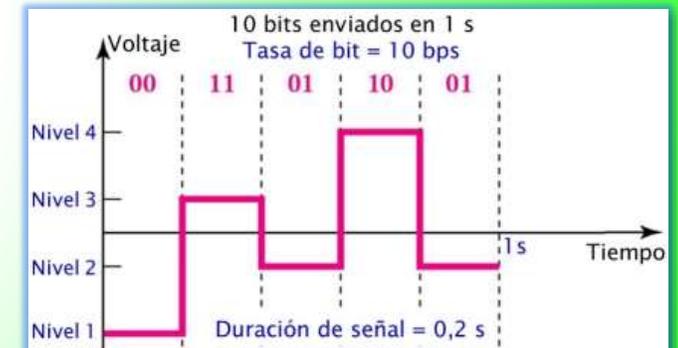
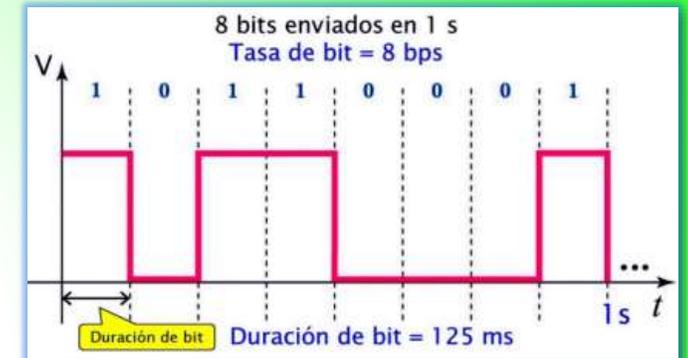
SEÑALES DIGITALES

Tasa de bits

(Forouzan, 2020)

- **La mayoría** de las señales digitales no son periódicas y, por tanto, el periodo y la frecuencia no son características apropiadas. Para describir las señales digitales se utiliza otro término, **tasa de bit** (en lugar de frecuencia).
- **La tasa de bits** es el número de bits enviados en 1s. expresado en bps. En las figuras se muestra la tasa de bit para dos señales. La tasa de bit se conoce también como velocidad de bits, tasa de transferencia de bits, velocidad de transmisión, etc.
- **Ejemplo 5.** Suponga que necesita descargar documentos de texto a razón de 100 páginas por segundo. Cuál es tasa de bit requerida del canal?
 - **Considere** que una página es un promedio de 24 líneas con 80 caracteres en cada línea y asuma que un carácter requiere 8 bits.

$$v_t = 100 \times 24 \times 80 \times 8 = 1,536 \text{ Mbps}$$



Características de las señales digitales

SEÑALES DIGITALES

Tasa de bits

(Forouzan, 2020)

- ▶ **Ejemplo 6.** ¿Cuál es la tasa de bit para la televisión de alta definición?
 - ▶ La **televisión** de alta definición utiliza señales digitales para emitir señales de video de alta calidad. La pantalla de HDTV es normalmente una relación de 16:9 (en contraste con 4:3 para la televisión normal).
 - ▶ Hay **1.920 por 1.080 pixeles** por pantalla.
 - ▶ Un **pixel** indica la superficie homogénea más diminuta que forma parte de una imagen. El color de esta unidad se codifica con 24 bits (en HDTV), utilizando el modelo más habitual **RGB** (Red-Green-Blue), que determina el brillo y el color. Es decir, 24 bits representan un pixel de colores.
 - ▶ La **pantalla** se renueva 30 veces por segundo.
 - ▶ Las **estaciones de televisión** reducen esta tasa al rango entre 20 a 40 Mbps a través de la compresión (MP4).



$$v_t = 1.920 \times 1080 \times 24 \times 30 \approx 1,5 \text{ Gbps}$$

60 pulgadas

152,4 cm

132,8 cm

74,7 cm

Características de las señales digitales

SEÑALES DIGITALES

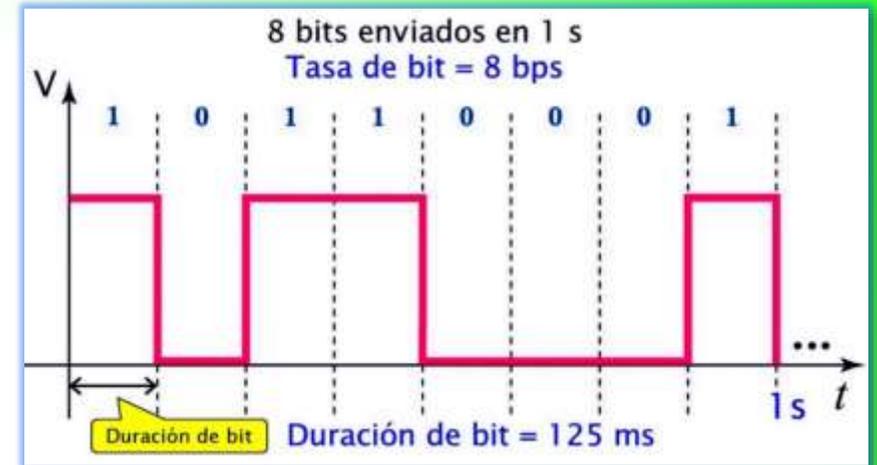
Tiempo de duración de bit

(Forouzan, 2020)

- **Para describir** las señales digitales (no periódicas) la frecuencia no es una característica apropiada, en lugar de la frecuencia se ha introducido el término **tasa de bits**. Ahora, para la periodicidad se usará el **tiempo de duración de bit**.
- **El tiempo de duración de bit** es el tiempo necesario para enviar un bit. Su unidad es s. Se usa en lugar del periodo.
- **La duración de bit y la tasa de bit** son inversos entre sí.

$$v_t(\text{bps}) = \frac{1}{t_b(\text{s})}$$

v_t = tasa de bit (velocidad de transmisión), en **bps**.
 t_b = tiempo de duración de bit, en **s**.



- **Ejemplo 7.** Una señal digital tiene una tasa de bits de 2.000 bps. Calcule el tiempo de duración de cada bit.

$$t_b = 500 \mu\text{s}$$

- **Ejemplo 8.** Calcule el tiempo de un bit a 230,4 kbps.

$$t_b = 4,34 \mu\text{s}$$

- **Ejemplo 9.** Calcule la tasa de bit de la señal de la figura.

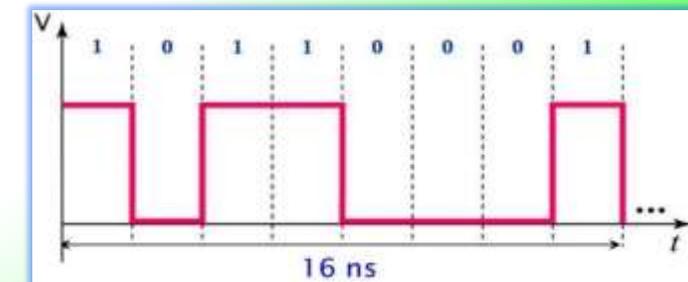
$$v_t = 500 \text{ Mbps}$$

- **Ejemplo 10.** Un bloque de 256 paquetes de datos secuenciales se transmite en serie en 0.16 s. Cada paquete tiene 12 bits. Calcule:

a) $v_t = 19,2 \text{ kbps}$

b) $t_b = 52 \mu\text{s}$

c) $t_p = 624 \mu\text{s}$



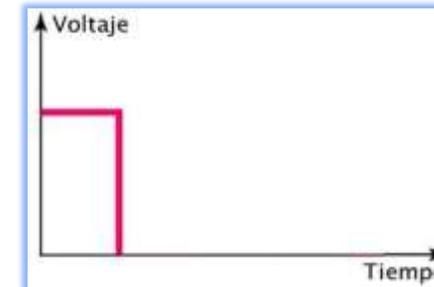
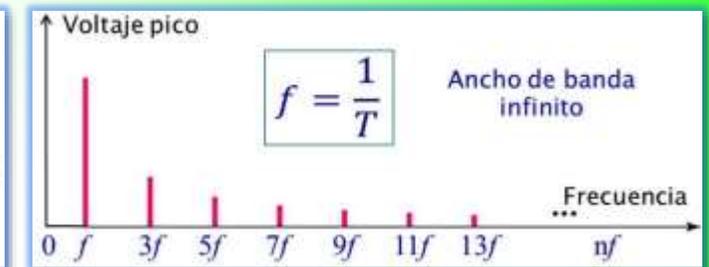
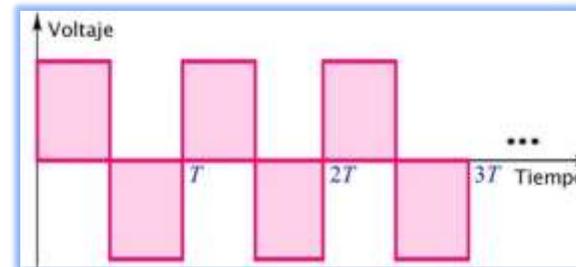
Características de las señales digitales

SEÑALES DIGITALES

La señal digital como señal analógica compuesta

(Blake, 2004)

- **El análisis matemático de Fourier** establece que una señal digital es una señal analógica compuesta por un ancho de banda infinito, y, por tanto, puede ser también periódica y aperiódica.
- **►1. Señal digital periódica.** Rara en comunicaciones. A principios de 1800, Jean Baptista Fourier demostró que cualquier señal digital periódica es una combinación de ondas seno de frecuencias discretas de valores enteros (1, 2, 3, 4, ..), denominadas frecuencia fundamental, 2do. armónico, 3er. armónico, etc. El análisis matemático se conoce como **Serie de Fourier**.
- **►2. Señal digital aperiódica.** A principios de 1800, Jean Baptista Fourier demostró que cualquier señal digital aperiódica es una combinación de un número infinito de ondas seno de frecuencias continuas de valores reales. Las características no repetitivas se resuelven en un espectro de frecuencias mucho más complejo, denominado **Transformación de Fourier**.
- **El ancho de banda** de ambos tipos de señales digitales es infinito, aunque el ancho de banda efectivo es finito.



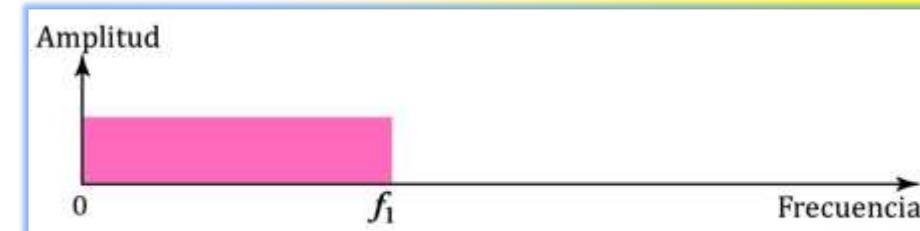
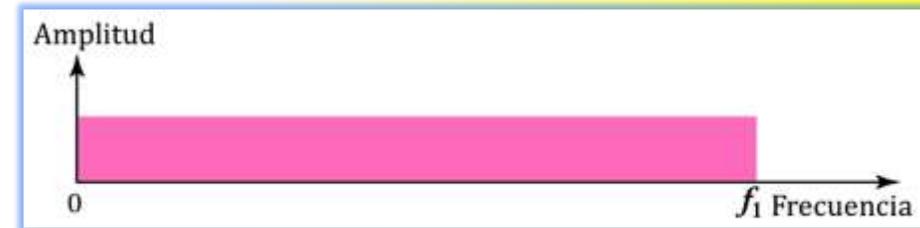
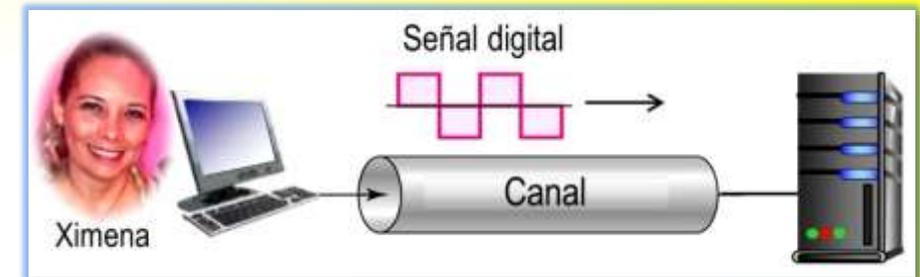
2. TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN BANDA BASE

SEÑALES DIGITALES

Transmisión en banda base

(Blake, 2004) (Forouzan, 2020)

- **En la transmisión** de una señal digital aperiódica, similar a las que se encuentran en las transmisiones de datos, la cuestión fundamental es ¿cómo se la puede enviar entre dos dispositivos? La respuesta es: usando transmisión en **banda base** o transmisión en **banda ancha** (con modulación).
- **La transmisión en banda base** consiste en enviar una señal por un canal sin cambiar la señal digital a una analógica.
- **La transmisión en banda base** necesita la existencia de un **canal paso-baja**, un canal con un ancho de banda que comience en cero. Este es el caso si se tiene un medio dedicado que tiene un único canal. Por ejemplo todo el ancho de banda de un cable que conecta dos PC en un único canal.
 - **El ancho de banda** de un medio de transmisión es el rango de frecuencias que ese medio deja pasar, se comporta como un filtro.
- **Otro ejemplo** es que se pueden conectar varios PC a un bus, pero sólo dos se pueden comunicar al mismo tiempo. Así, se tiene un canal paso baja y se puede usar para la comunicación en banda base.
- **Las figuras** muestran dos canales paso-baja: uno con un ancho de banda amplio y el otro con uno estrecho.
- **Un canal paso-baja** con una ancho de banda infinito es ideal, pero no se pueden tener tales canales en la vida real. Sin embargo, en la práctica, se hace una aproximación.



Caso 1: Canal paso-baja con ancho de banda amplio

(Forouzan, 2020)

- **Si se quiere** conservar la forma exacta de una señal digital, es necesario enviar el espectro completo, el rango continuo de frecuencias entre cero e infinito. Es posible si se tiene un medio dedicado con un ancho de banda infinito o muy grande entre el emisor y receptor que conserve la amplitud exacta de cada componente de cada señal compuesta,
- **Aunque esto** es posible en un PC (por ejemplo entre la CPU y la memoria), no es posible entre dos hosts. Por fortuna, las amplitudes de la frecuencias del extremo del ancho de banda de la señal son tan pequeñas que se permiten ignorar. Esto significa que si hay un medio como un cable coaxial o una fibra óptica, con un ancho de banda muy grande, dos hosts pueden comunicarse usando señales digitales con una precisión muy elevada, sin que la velocidad sea afectada.
 - **Aunque la señal de salida** no es una réplica exacta de la señal original, los datos pueden deducirse de la señal recibida. Algunas frecuencias son bloqueadas por el medio, pero no son críticas y tampoco se ve afectada la velocidad de bits.
- **Ejemplo 11.** Un canal dedicado donde todo el ancho de banda del medio se utiliza como un solo canal es una LAN. Casi todas las LAN utilizan un canal dedicado para dos hosts que se comunican entre sí.
 - **En una LAN de topología en bus** con conexiones multipunto, solo dos hosts pueden comunicarse entre sí cada momento (tiempo compartido), las otros hosts deben abstenerse de enviar datos.
 - **En una LAN de topología en estrella**, todo el canal entre cada host y el switch se utiliza para la comunicación entre estos dos dispositivos.



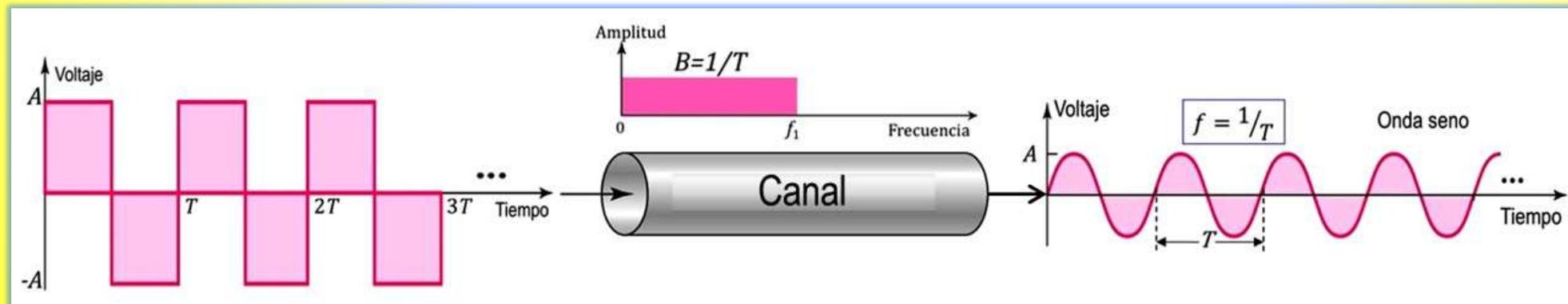
Transmisión de señales en banda base

SEÑALES DIGITALES

Caso 2: Canal paso-baja con ancho de banda limitado

(Forouzan, 2020)

- **En estos casos**, la señal digital se aproxima a una señal analógica. El nivel de aproximación depende del ancho de banda disponible.
- **Ejemplo 12.** Suponga que se tiene una señal digital de velocidad de N bps. Si se quiere enviar señales analógicas para simular aproximadamente esta señal, se tiene que considerar el peor de los casos: un número máximo de cambios en la señal digital. Esto ocurre cuando la señal lleva la secuencia 01010101... o 10101010....
- **Para simular** estos dos casos, suponga que 1 es el valor pico positivo y 0 es el negativo. Se envían dos bits por ciclo. El periodo de la señal analógica sería dos tiempos de duración de bit, es decir $T = 2/N$, por tanto, se necesita una señal de frecuencia $f = N/2$, la cual equivale a la frecuencia fundamental de la señal digital.



- **Solo con una frecuencia** no se pueden reproducir todos los patrones; sin embargo, utilizando esta frecuencia fundamental se logra una primera aproximación, por tanto el ancho de banda necesario sería $B = N/2$.

Transmisión de señales en banda base

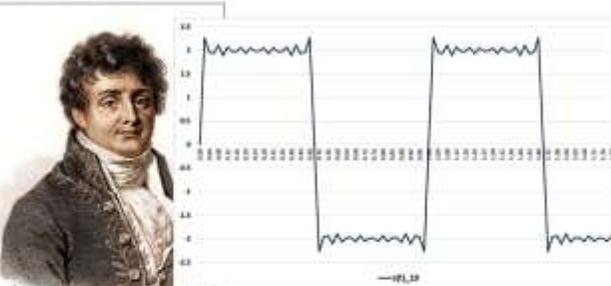
SEÑALES DIGITALES

Caso 2: Canal paso-baja con ancho de banda limitado (cont.)

(Blake, 2004)

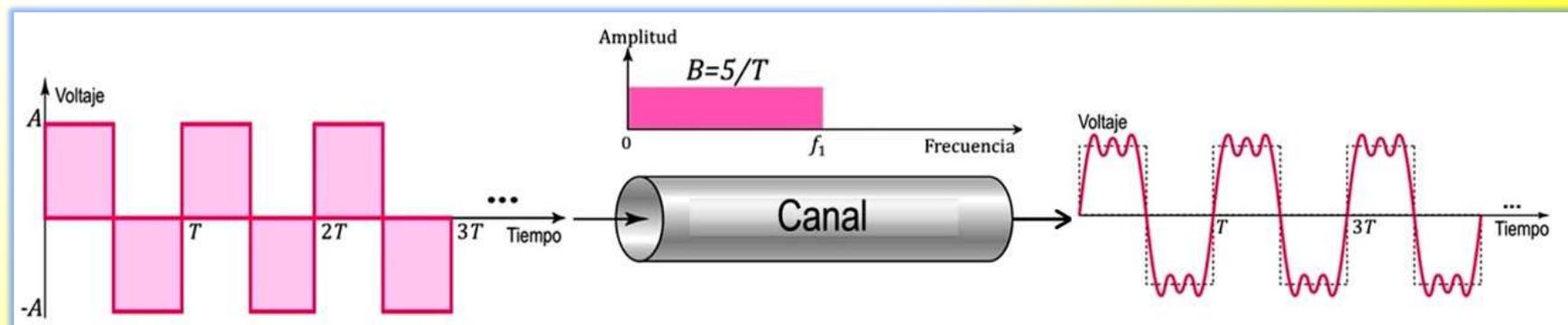
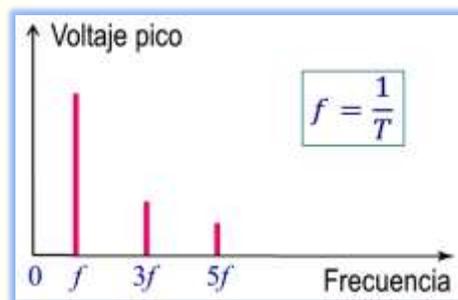
- **Para hacer** que la forma de la señal analógica se parezca más a la señal digital, es necesario añadir más armónicos de la frecuencias, es decir, es necesario incrementar al ancho de banda, se puede incrementar el ancho de banda a $3N/2$, $5N/2$, $7N/2$, etc. vea el efecto en la figura.

Te mentí, no veremos series en Netflix



$$S(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]$$

Veremos las series de FOURIER



Transmisión de señales en banda base

SEÑALES DIGITALES

Velocidad de transmisión

(Forouzan, 2020)

- **Es necesario** recordar que el ancho de banda es proporcional a la tasa de bit. Para enviar bits más rápido, se necesita más ancho de banda. En la transmisión en banda base, el ancho de banda es proporcional a la tasa de bits.
- **Una señal digital** con un intervalo de bit de $T/2$, requiere, para su transmisión, un canal con un **ancho de banda mínimo** igual a $B = N/2$. Por tanto, si la señal tiene 2 niveles, la velocidad de bits o capacidad de transmisión puede expresarse como: $v_t = C = 1/0,5T = 2B$.

- **Ejemplo 13.** Usando el método explicado, la tabla muestra cuánto ancho de banda se necesita para enviar datos a diferentes velocidades.
- **Ejemplo 14.** ¿Cuál es el ancho de banda requerido de un canal paso-baja si se necesita enviar **1 Mbps** usando la transmisión banda base?

Requisitos de ancho de banda			
Tasa de bits	Armónico 1	Armónicos 1, 3	Armónicos 1, 3, 5
$v_t = 1$ kbps	$B = 500$ Hz	$B = 1,5$ kHz	$B = 2,5$ kHz
$v_t = 10$ kbps	$B = 5$ kHz	$B = 15$ kHz	$B = 25$ kHz
$v_t = 100$ kbps	$B = 50$ kHz	$B = 150$ kHz	$B = 250$ kHz

- **R.** El **ancho de banda mínimo**, para una aproximación primera, es $B = C/2 = 500$ kHz; se necesita un canal paso-baja con frecuencias entre 0 y 500 KHz. Se consigue un mejor resultado usando los armónicos 1 y 3, siendo el ancho de banda necesario $B = 1,5$ MHz. Se puede conseguir un resultado todavía mejor usando los armónicos 1, 3 y 5, siendo el ancho de banda necesario $B = 2,5$ MHz.
- **Ejemplo 15.** Si se tiene un canal paso-baja con un ancho de banda de **100 kHz**. ¿Cuál es la tasa de bits de ese canal?
 - **R.** La **velocidad máxima** se puede conseguir usando el primer armónico. La tasa de bit es 2 veces el ancho de banda disponible, o **200 kbps**.

3. TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN BANDA ANCHA

SEÑALES DIGITALES

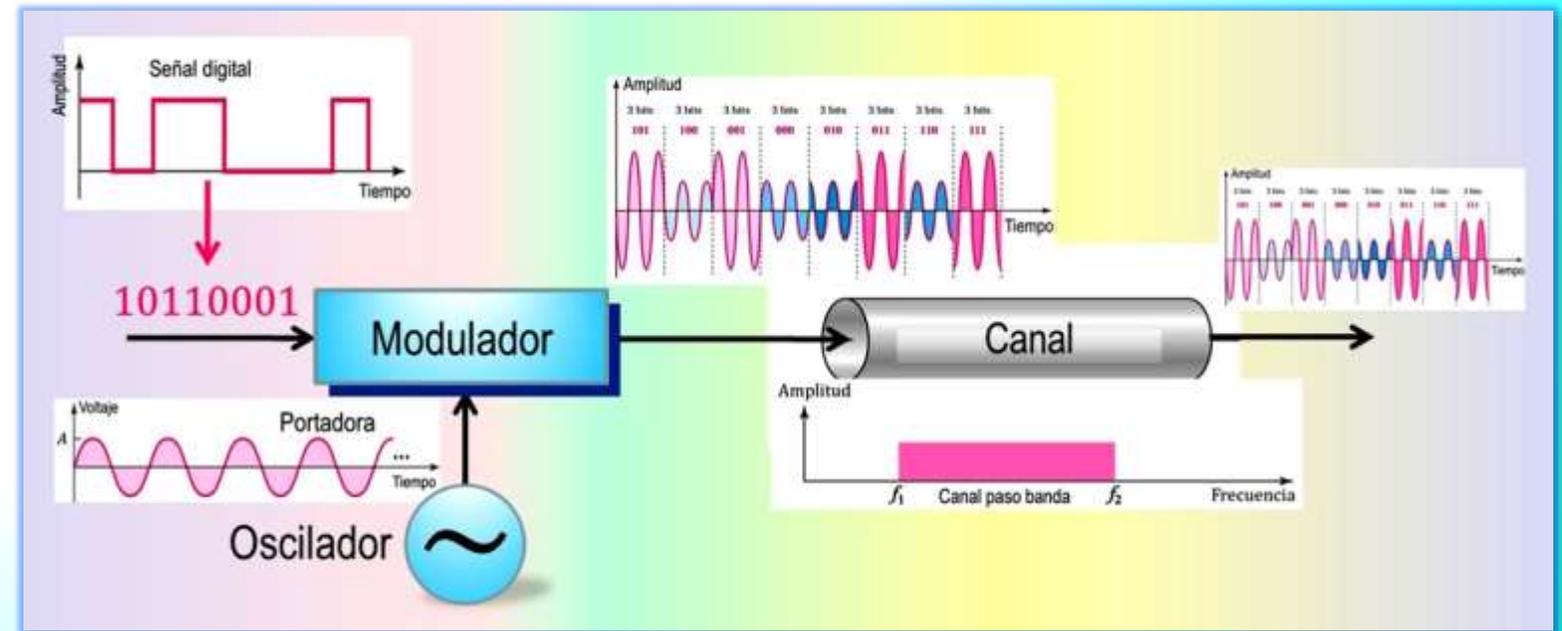
(Forouzan, 2020)

Transmisión en banda ancha (usando modulación)

- **Si el canal disponible** es un canal paso banda, no se puede enviar la señal digital directamente al canal; se convierte la señal digital en analógica antes de transmitir.
- **La transmisión en banda ancha** o con modulación implica cambiar la señal digital a una señal analógica para su transmisión. La modulación permite usar un canal paso banda, un canal con un ancho de banda que no empieza en cero. Este tipo de canal está más disponible que un canal paso-baja.



- **Ejemplo 16.** La figura muestra la modulación de una señal digital, la cual se convierte en una señal analógica compuesta. Se ha usado una señal analógica de frecuencia única (denominada portadora) generada por el oscilador.
- **La amplitud y la fase** de la portadora se han cambiado para que parezca la señal digital. Sin embargo el resultado no es una señal de frecuencia única; es una señal compuesta.



- **En el receptor**, la señal analógica recibida se convierte a digital, y el resultado es una réplica de lo que se ha enviado.

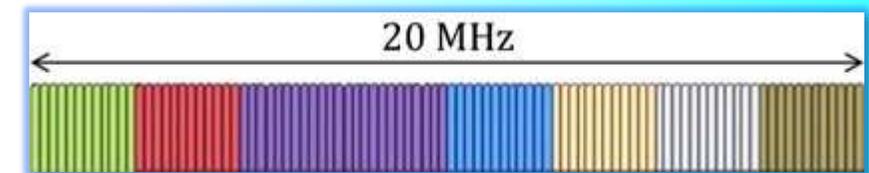
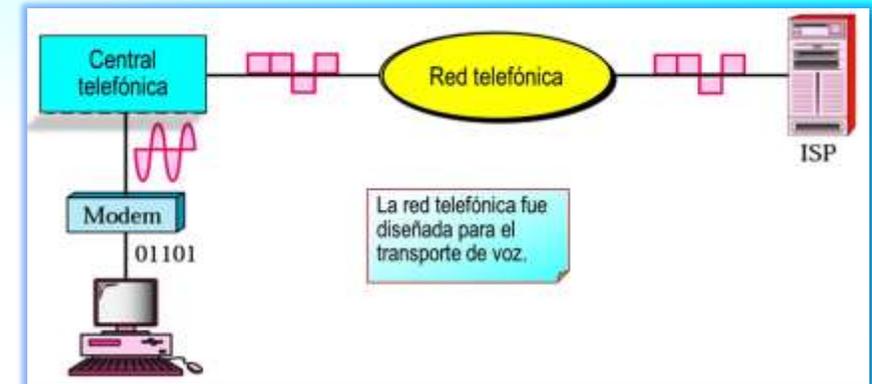
Transmisión de señales en banda ancha

SEÑALES DIGITALES

Ejemplos de transmisión en banda ancha

(Forouzan, 2020)

- ▶ **Ejemplo 17.** Un ejemplo de transmisión en banda ancha usando modulación es el envío de datos de un host a través de una línea telefónica, la línea que conecta a un residente con la central telefónica. Estas líneas instaladas hace ya muchos años, están diseñadas para transportar voz (una señal analógica) con un ancho de banda limitado (frecuencias entre 300 y 3.400 Hz).
 - ✉ Aunque este canal se puede usar como un canal paso-baja, normalmente se considera un canal paso banda. Una razón es que el ancho de banda es tan estrecho (3.100 Hz) que si se trata el canal como un paso-baja y se usa transmisión en banda base, la velocidad mínima que se puede conseguir es 6,2 kbps. La solución es considerarlo un canal paso banda, convertir la señal digital del PC en una señal analógica y viceversa en el receptor. En este caso, el convertidor se denomina **módem**.
- ▶ **Ejemplo 18.** Otro ejemplo es el smartphone. Para una mejor recepción, los smartphones convierten la señal analógica de la voz en una señal digital. Aunque el ancho de banda asignado a un operador de telefonía móvil es muy grande, todavía no se puede enviar la señal digital sin conversión. La razón es que solo hay disponible un canal paso banda entre el que llama y el llamado.
 - ✉ Por ejemplo, si el ancho de banda disponible es B y se permiten 1.000 conversaciones simultáneas, el canal disponible es $B/1.000$, solo parte del ancho de banda total, por lo que es necesaria la conversión de la señal antes de enviarla. Los smartphones convierten la señal analógica de audio en una digital y luego la convierten de nuevo en analógica para su transmisión por un canal paso banda.



Referencias bibliográficas

SEÑALES DIGITALES

Referencias bibliográficas

- APC, Asociación para el progreso de las comunicaciones (2007). *Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo*. Mountain View, CA. USA: Limehouse Book Sprint Team.
- Blake, Roy (2004). *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. México: Thomson.
- Frenzel (2003). *Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*. Madrid: Alfaomega.
- Forouzan, B. A. (2020). *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.
- Kraus, J., & Fleisch, D. (2000). *Electromagnetismo con Aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
- RadioMobile. *RadioMobile*. Recuperado el 16 de marzo de 2015, de <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>.
- Stallings, William (2007). *Data and Computer Communication*. New Jersey: Pearson.

FIN

Tema 3 de:
TRANSMISIÓN DE DATOS
Edison Coimbra G.