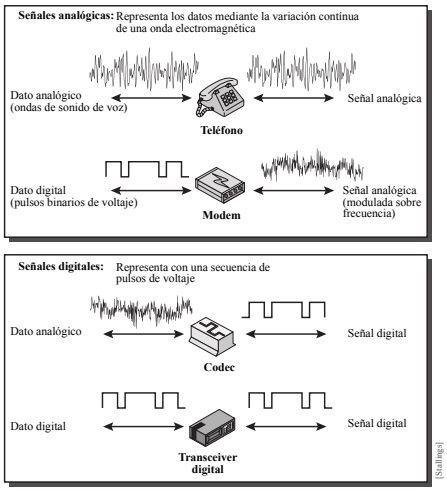
Capítulo 2

Nivel físico



Generado: 30/10/2024 12:01:58

Cuestiones

Q-2.1 ¿Cuál es la diferencia entre par trenzado apantallado y no apantallado?

Q-2.2 En una red a 10 Mbps que utilizaría cableado UTP, Coaxial o F.O. Justifique su respuesta.

Q-2.3 ¿Cuál es la desventaja principal de una transmisión asíncrona? ¿Cómo se realiza la sincronización en la transmisión síncrona?

Q-2.4 ¿Cuál es el ancho de banda de una señal analógica compuesta?

Q-2.5 Una señal digital tiene 8 niveles. ¿Cuántos bits por nivel son necesarios?

Q-2.6 Una señal digital tiene 9 niveles. ¿Cuántos bits por nivel son necesarios?

Q-2.7 Determina la velocidad del canal para descargar páginas de texto a una velocidad de 100 páginas por minuto. Considere que cada página tiene 24 líneas de texto con 80 caracteres por línea y que cada carácter se codifica con 8 bits.

Q-2.8 Una imagen en color utiliza 16 bits para representar un pixel ¿Cuál es el máximo número de colores diferentes que se pueden representar?

Q-2.9 ¿Cuál es la relación entre periodo y frecuencia?

Q-2.10 ¿Qué es la medida de amplitud de una señal? ¿Qué es la medida de frecuencia de una señal? ¿Qué es la medida de fase de una señal?

Q-2.11 ¿Cómo se puede descomponer una señal compuesta en sus frecuencias individuales?

Q-2.12 Nombra tres tipos de perturbaciones en la transmisión.

Q-2.13 Distingue entre transmisión banda base y transmisión banda ancha.

Q-2.14 Distingue entre filtro pasa-bajo y filtro pasa-banda.

Q-2.15 ¿Qué aporta el Teorema de Nyquist al campo de las comunicaciones?

Q-2.16 ¿Qué aporta la Capacidad de Shannon al campo de las comunicaciones?

Q-2.17 ¿Por qué las señales ópticas utilizada en cables de fibra óptica tienen una longitud de onda muy corta?

Q-2.18 ¿Podemos decir si una señal es periódica o no periódica sólamente viendo su diagrama de frecuencias? ¿Cómo?

Q-2.19 ¿El diagrama de frecuencias de una señal de voz es discreto o continuo?

Q-2.20 ¿El diagrama de frecuencias de un sistema de alarma es discreto o continuo?

Q-2.21 Enviamos una señal de voz desde un micrófono a un grabador. ¿Es una transmisión banda base o banda ancho?

Q-2.22 Enviamos una señal digital desde una estación LAN a otra estación. ¿Es una transmisión banda base o banda ancho?

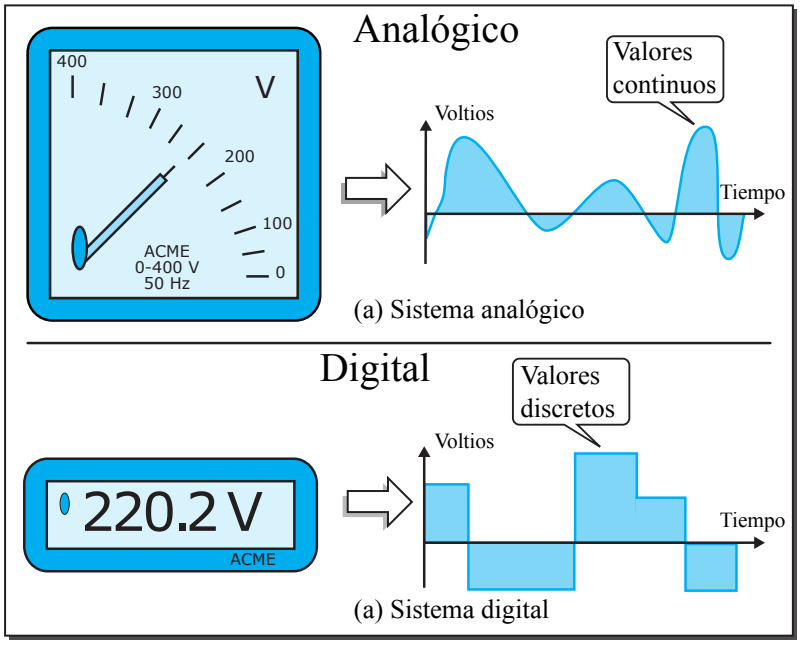
Q-2.23 ¿Cuales son las técnicas de multiplexión utilizadas para combinar señales analógicas? ¿Y para señales digitales?

Q-2.24 Distingue entre TDM multinivel, TDM multiple slot y TDM con inserción de pulsos.

Q-2.25 Distingue entre TDM síncrina y estadística.

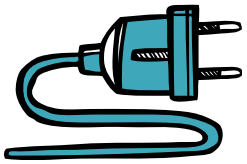
Q-2.26 Define el espectro expandido y su finalidad. Indica las técnicas de espectro expandido que conoces.

A



- Amplitud, frecuencia y fase
- Ancho de banda
- Espectro de frecuencias
- Dominio de frecuencias y temporal
- Tasa de bit
- Señal simple y compuesta
- Longitud de onda
- Bit y símbolo

Ref: 2-A-01 | Problema: 2.1



La señal eléctrica utilizada en los hogares de Europa tiene una frecuencia de 60 Hz, ¿cuál es su periodo?

Resolución:

El periodo de la señal es la inversa de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60\,\text{Hz}} = 0{,}0166\,\text{s} = 16{,}6\,\text{ms}$$

lo que significa que el periodo de la señal de luz en nuestras casas es 0,0166 s ó 16,6 ms, y no lo percibimos porque nuestro ojo no tiene la sensibilidad suficiente para percibir esa velocidad, tan alta, de cambios de amplitud de la señal.

Ref: 2-A-02 ☺ ? R Problema: 2.2

Un periodo de 100 ms.

a) Exprésalo en microsegundos (μs).

b) ¿Cuál es su frecuencia expresada en Kilohertzios (kHz)?

Resolución:

a) A partir de la tabla:

Periodo (T)		*Frecuencia (f)*	
Unidad	*Equivalencia*	*Unidad*	*Equivalencia*
Segundos (s)	1 s	Hertz (Hz)	1 Hz
Milisegundos (ms)	10^{-3} s	Kilohertz (kHz)	10^{3} Hz
Microsegundos (µs)	10^{-6} s	Megahertz (MHz)	10^{6} Hz
Nanosegundos (ns)	10^{-9} s	Gigahertz (GHz)	10^{9} Hz
Picosegundos (ps)	10^{-12} s	Terahertz (GHz)	10^{12} Hz

se obtienen las diferentes equivalencias:

$$100\,\text{ms} = 100 \cdot 10^{-3}\,\text{s} = 100 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{6}\,\mu\text{s} = 10^{5}\,\mu\text{s}$$

b) Para calcular la frecuencia, en primer lugar convertimos a segundos:

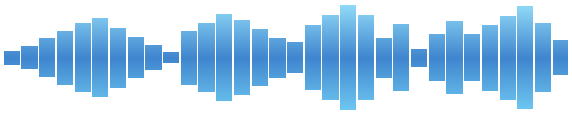
$$100\,\text{ms} = 100 \cdot 10^{-3}\,\text{s} = 10^{-1}\,\text{s} = 0{,}1\,\text{s}$$

por tanto, la frecuencia será:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10^{-1}}\,\text{Hz} = 10 \cdot 10^{-3}\,\text{kHz} = 10^{-2}\,\text{kHz}$$

Ref: 2-A-03 Problema: 2.3

Sea la señal periódica compuesta por cinco señales sinusoidales de frecuencias 100, 300, 500, 700 y 900 Hz.



a) ¿Cuál es su ancho de banda?

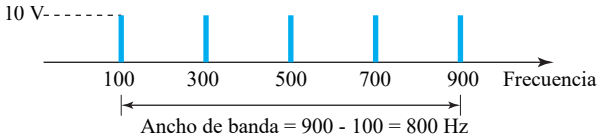
b) Representa el espectro de frecuencias asumiendo un valor pico de 10 V.

Resolución:

a) Sean f_h y f_l las frecuencias más alta y baja, respectivamente, entonces, tenemos un ancho de banda:

$$B = f_h - f_l = 900 - 100 = 800\,\text{Hz}$$

b) El espectro de frecuencias:

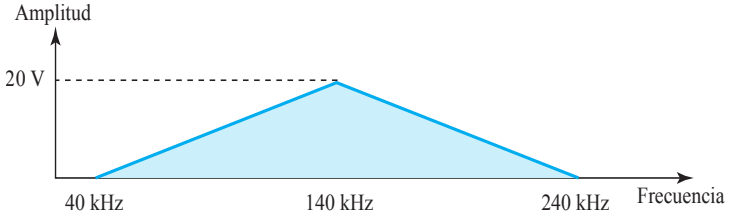


Ref: 2-A-05 | Problema: 2.4

Una señal no periódica compuesta tiene un ancho de banda de 200 kHz, con una frecuencia central de 140 kHz, pico de amplitud de 20 V y los dos extremos de frecuencias de amplitud 0 V. Representa el dominio de frecuencias de la señal.

Resolución:

El espectro de frecuencia de una señal no periódica:

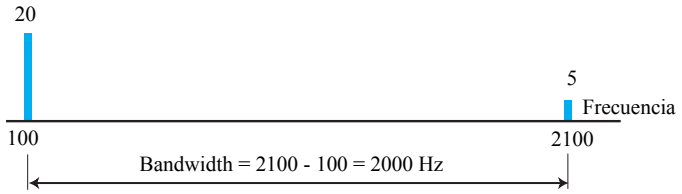


Ref: 2-A-07 | Problema: 2.5

Una señal periódica compuesta con un ancho de banda de 2000 Hz está compuesta por dos ondas sinusoidales. La primera tiene una frecuencia de 100 Hz con una amplitud máxima de 20 V; la segunda tiene una amplitud máxima de 5 V. Representa el ancho de banda.

Resolución:

Sabemos que el ancho de banda es 2000 Hz. La frecuencia mayor debe ser $100 + 2000 = 2100\,\text{Hz}$, por lo tanto:



Ref: 2-A-08 | Problema: 2.6

Indica la tasa de bit de una señal en la que:

a) 1 bit dura 0,001 s.
b) 1 bit dura 2 ms.
c) 10 bits duran 20 μs.
d) 1000 bits duran 250 ps.

Resolución:

La tasa de bit (N) es la inversa del *tiempo/intervalo de bit*:

$$N = \frac{1}{IntervaloBit}$$

por lo tanto:

a)

$$N = \frac{1\,\text{bit}}{0{,}001\,\text{s}} = 1000\,\text{bps} = 1\,\text{kbps}$$

b)

$$N = \frac{1\,\text{bit}}{2\,\text{ms}} = 500\,\text{bps}$$

c)

$$N = \frac{1\,\text{bit}}{\frac{20\,\mu\text{s}}{10}} = \frac{1\,\text{bit}}{2\,\mu\text{s}} = 500\,\text{kbps}$$

d)

$$N = \frac{1\,\text{bit}}{\frac{250\,\text{ps}}{1000}} = \frac{1000\,\text{bit}}{250\,\text{ps}} = 4\,\text{Tbps}$$

Ref: 2-A-09 | Problema: 2.7

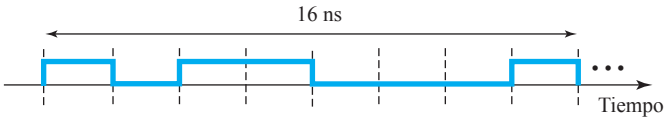
Un dispositivo está enviando datos a una tasa de 1000 bps. ¿Cuánto tarda en transmitir los siguientes bloques de información?

a) 10 bits
b) Un carácter (8 bits)
c) Un fichero de 100000 caracteres

Sol: *a*) 10 ms *b*) 8 ms *c*) 800 s

Ref: 2-A-10 | Problema: 2.8

¿Cuál es la tasa de bit para la señal de la figura?



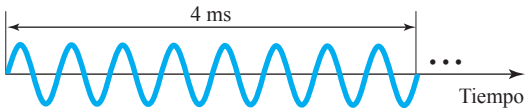
Resolución:

Hay 8 bits en 16 ns, por lo tanto, la tasa de bits:

$$N = \frac{8\,\text{bit}}{16\,\text{ns}} = 0{,}5\,\text{Gbps} = 500\,\text{Mbps}$$

Ref: 2-A-11 | Problema: 2.9

¿Cuál es la frecuencia de la señal de la figura?



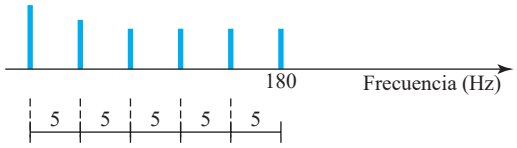
Resolución:

La señal realiza 8 ciclos en 4 ms, por lo tanto, la frecuencia:

$$f = \frac{8\,\text{ciclos}}{4\,\text{ms}} = 2\,\text{kHz}$$

Ref: 2-A-12 | Problema: 2.10

¿Cuál es el ancho de banda (B) de la señal compuesta de la figura?



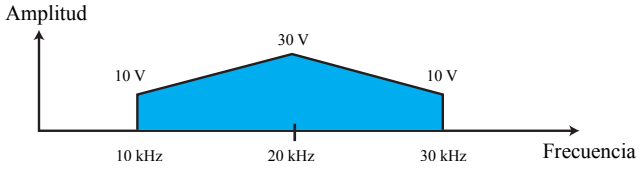
Sol: 25 Hz

Ref: 2-A-14 | Problema: 2.11

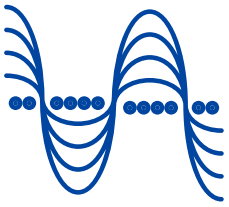
Una señal compuesta no periódica contiene frecuencias desde 10 hasta 30 kHz. El pico de amplitud es 10 V para la señal más baja y 30 V para la señal más alta en 20 kHz. Suponemos que la amplitud cambia gradualmente desde el mínimo hasta el máximo. Representa el espectro de frecuencias.

Resolución:

La señal es no-periódica, por lo tanto, el dominio de frecuencias está formado por un espectro continuo:



Ref: 2-A-15 Problema: 2.12



¿Cuál es la longitud de onda de la luz roja ($f = 400\,\text{THz}$) en el aire?

Resolución:

Si suponemos la velocidad de la luz en el aire es $c = 3 \cdot 10^8\,\text{m/s}$, tenemos que la longitud de onda de la luz roja en el aire:

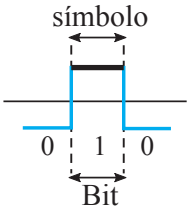
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8\,\text{m/s}}{4 \cdot 10^{14}\,\text{Hz}} = 0{,}75 \cdot 10^{-6}\,\text{m} = 0{,}75\,\mu\text{m (microns)}$$

Ref: 2-A-17 | Problema: 2.13

Explique la diferencia entre **bit** y **símbolo**.

Resolución:

- **Bit**: en las comunicaciones de datos, el objetivo es enviar bits de datos. Un bit es la entidad más pequeña que puede representar un elemento de información.
- **Símbolo**: en una comunicación de datos digitales, los bits son transportados por símbolos (variaciones de voltaje). Un símbolo es la unidad más corta (en cuanto a tiempo) de una señal digital.



En definitiva, los bits son transportados; los símbolos son los portadores.

Ref: 2-A-20 ☺☺ ? R Problema: 2.14

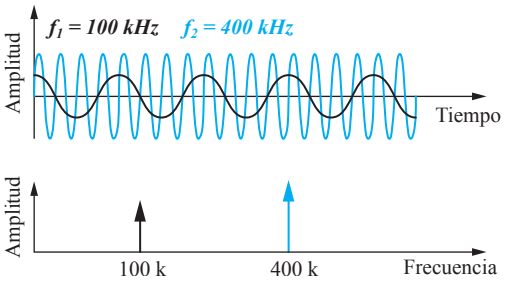
Esboza una señal analógica compuesta de dos componentes de frecuencia, $f_1 = 100k$ Hz y $f_2 = 400k$ Hz. Haz la representación en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, en los siguientes casos:

a) Señal periódica

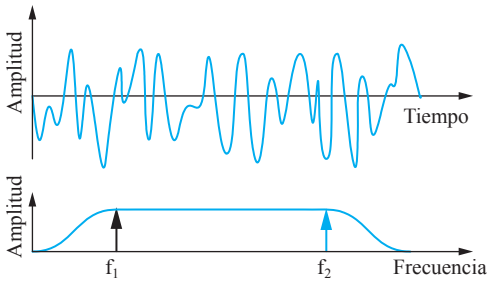
b) Señal no periódica

Resolución:

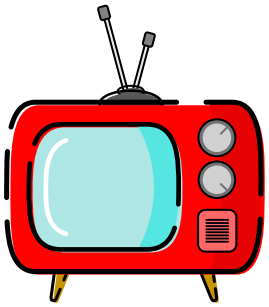
a) Señal analógica periódica:



b) Señal analógica periódica:



Ref: 2-A-50 | ☺☺☺ | ? | R | Problema: 2.15



Esboza el funcionamiento de la TV analógica en B/N desde el punto de vista de la transmisión de una señal analógica compuesta no-periódica.

Resolución:

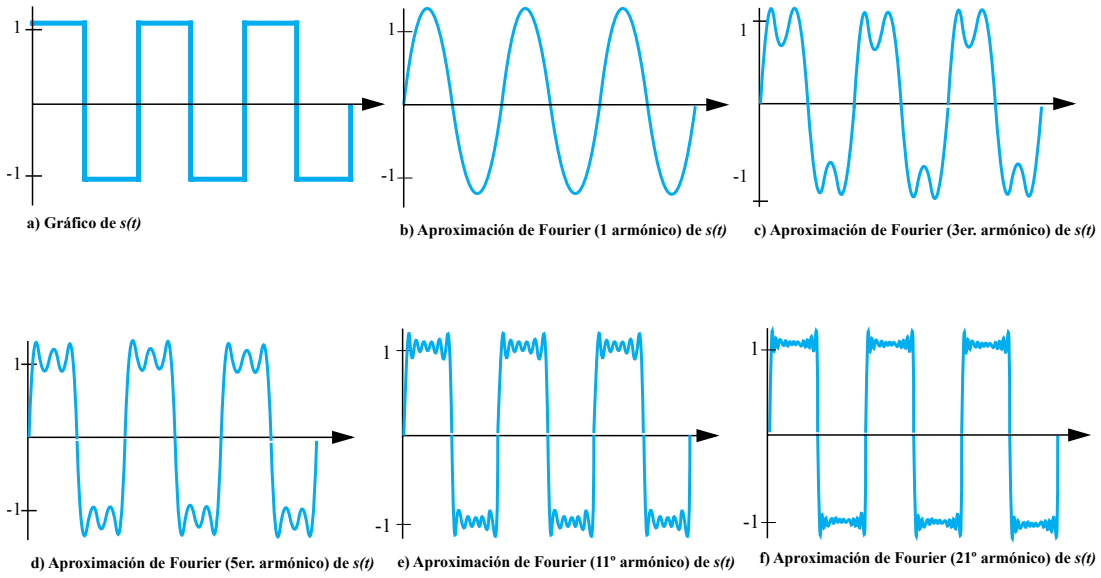
La señal recibida en la antigua TV analógica en blanco y negro es un ejemplo de transmisión de señales analógicas compuestas no periódicas.

La pantalla de TV está formada por píxels, de forma que cada píxel puede ser blanco o negro. Si suponemos una resolución de 525×700 (525 líneas verticales y 700 líneas horizontales), que corresponde a una ratio 3:4, suponen 367500 pixels por pantalla. Si el refresco de pantalla es 30 veces por segundo, supone $367500 \times 30 = 11025000$ pixels/s.

El peor escenario es alternando píxels blanco y negro. En este caso, se necesita representar un color con la amplitud mínima y el otro con la amplitud máxima, es decir, enviando 2 pixels por ciclo. Por lo tanto, se necesitan $11025000/2 = 5512500$ ciclos/s ó Hz. Es decir, se necesitan 5,5125 MHz.

El peor caso tiene una probabilidad baja de ocurrencia por lo que se supone sólo necesitamos el 70 % de ese ancho de banda, es decir, 3,85 Mhz. Además, como también se necesitan señales de audio y sincronización, se añade otro ancho de banda de 4 MHz al canal de TV en blanco y negro. En definitiva, la TV analógica en blanco y negro tiene un ancho de banda de 6 MHz y compuesto de señales analógicas no-periódicas.

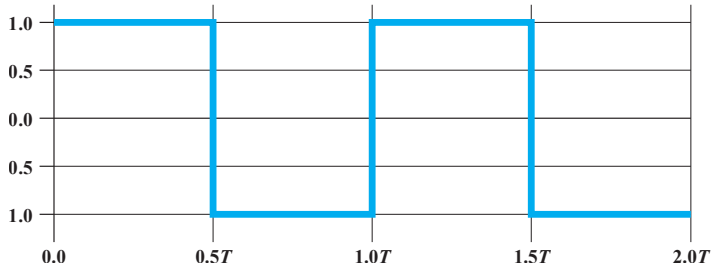
B



- □ Teorema de Fourier
- □ Armónicos
- □ Frecuencia fundamental
- □ Ancho de banda vs velocidad de transmisión
- □ Ecuación de onda
- □ Filtro paso alto/bajo

Ref: 2-B-01 ☺☺☺☺ ? R Problema: 2.16

Supongamos que estamos utilizando un sistema de transmisión digital y que es capaz de transmitir señales con un ancho de banda de 4 MHz. Vamos a intentar transmitir una secuencia de 1s y 0s alternantes según la onda cuadrada siguiente:



¿Qué tasa de datos se puede conseguir? Supongamos los siguientes casos:

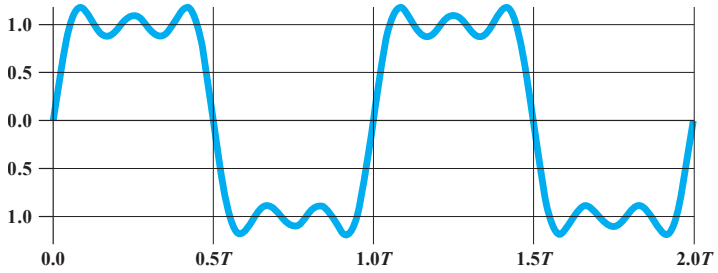
a) Aproximando la onda cuadrada mediante la frecuencia fundamental y dos armónicos.

b) El caso anterior, pero suponiendo un ancho de banda de 8 MHz.

c) Considerando sólo dos armónicos, $f = 2\,\text{MHz}$ y ancho de banda del medio de $4\,\text{MHz}$.

Resolución:

a) Podemos aproximar la onda cuadrada con la siguiente onda sinusoidal compuesta:



que corresponde a la ecuación de onda sinusoidal:

$$s(t) = \frac{4}{\pi}\left(\sin(2\pi f t) + \frac{1}{3}\sin(2\pi(3f)t) + \frac{1}{5}\sin(2\pi(5f)t)\right) \tag{2.1}$$

Aunque esta onda es una onda cuadrada *distorsionada*, está suficientemente cerca de la onda cuadrada teórica, de forma que, el receptor pueda discriminar entre el `0` y el `1` binarios. Si definimos f la frecuencia fundamental de la señal, entonces, el ancho de banda necesario de la señal:

$$B = 5f - f = 4f$$

Si disponemos de un ancho de banda efectivo del canal de $B = 4\,\text{MHz}$, entonces:

$$4f = 4\,\text{MHz}$$

por lo que, la frecuencia fundamental:

$$f = 1\,\text{MHz} = 10^6\,\text{Hz}$$

entonces, sustituyendo en la expresión (2.1):

$$s(t) = \frac{4}{\pi}\left(\sin(2\pi 10^6 t) + \frac{1}{3}\sin(2\pi(3\cdot 10^6)t) + \frac{1}{5}\sin(2\pi(5\cdot 10^6)t)\right) \tag{2.2}$$

Si tenemos que $f = 1\,\text{MHz}$, entonces el periodo de la frecuencia fundamental:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1\,\text{MHz}} = 1\,\mu\text{s}$$

Si suponemos el caso teórico óptimo, una onda sinusoidal cuadrada como una sucesión de 1s y 0s, donde se transmiten dos bits en cada periodo, tenemos que la velocidad de transmisión:

$$V_t = \frac{2\,\text{bits}}{T\,\text{s}} = \frac{2\,\text{bits}}{1\,\mu\text{s}} = 2\,\text{Mbps}$$

b) Si suponemos un ancho de banda del doble, es decir, 8 MHz, y considerando la forma de onda anterior, definida por la expresión (2.2), tenemos que $f = 2\,\text{MHz}$. Por lo tanto, en este caso:

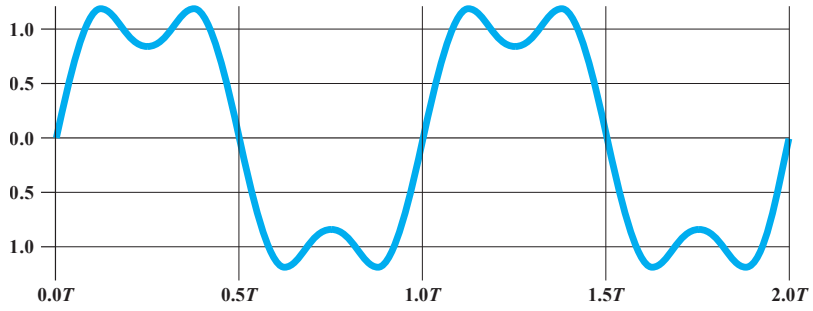
$$T = \frac{1}{f} = 0{,}5\,\mu\text{s}$$

y la velocidad de transmisión:

$$V_t = \frac{2\,\text{bits}}{T\,\text{s}} = \frac{2\,\text{bits}}{0{,}5\,\mu\text{s}} = 4\,\text{Mbps}$$

En definitiva, si se duplica el ancho de banda, dejando igual el resto de parámetros, se duplica la velocidad de transmisión potencial.

c) Si consideramos que dos armónicos (frecuencia fundamental más primer armónico) es una buena aproximación de la onda cuadrada, entonces, la señal tendría la siguiente representación temporal:



y vendría definida por:

$$s(t) = \frac{4}{\pi}\left(\sin(2\pi f t) + \frac{1}{3}\sin(2\pi(3ft))\right)$$

Suponiendo $f = 2\,\text{MHz}$, tenemos que el ancho de banda necesario:

$$B = 3f - f = 2f = 2 \cdot 2\,\text{MHz} = 4\,\text{MHz}$$

luego, con un ancho de banda del medio de 4 MHz, es suficiente para las necesidades de la señal. Si tenemos que:

$$T = \frac{1}{f} = 0{,}5\,\mu\text{s}$$

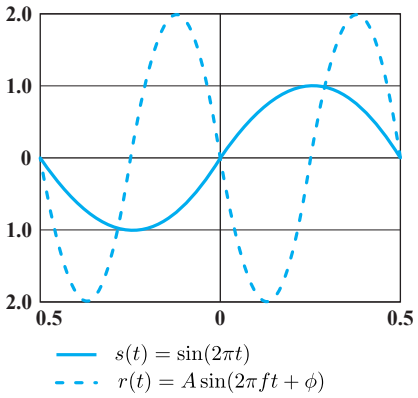
entonces, la velocidad de transmisión:

$$V_t = \frac{2\,\text{bits}}{T\,\text{s}} = \frac{2\,\text{bits}}{0{,}5\,\mu\text{s}} = 4\,\text{Mbps}$$

En definitiva, un determinado ancho de banda puede proporcionar varias velocidades de transmisión dependiendo de la habilidad del receptor para diferenciar entre 0 y 1, en presencia de ruido y otros defectos.

Ref: 2-B-03 ☺☺☺ Problema: 2.17

En la figura adjunta, sean la funciones $s(t) = \sin(2\pi t)$ y $r(t) = A\sin(2\pi ft + \phi)$. ¿Cuáles son los valores de A, f y ϕ?



Sol: $A = 2$, $f = 2$ y $\phi = \pi$

Ref: 2-B-07 ☺☺☺☺ ? R Problema: 2.18

Dada la siguiente señal periódica expresada en el dominio de la frecuencia:

$$s(t) = 5 + 4\sin(2\pi 200t) + 5\sin(2\pi 400t) + 2\sin(2\pi 600t) + 7\sin(2\pi 800t)$$

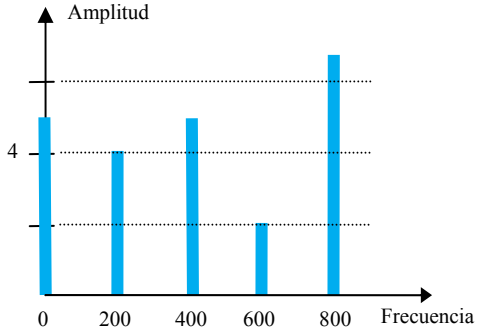
a) Representa su espectro de frecuencias.

b) Dado un medio de transmisión que actúa como un filtro paso bajo con $f_c = 500\,\text{Hz}$, dibujar el espectro de frecuencias de la señal después del filtro.

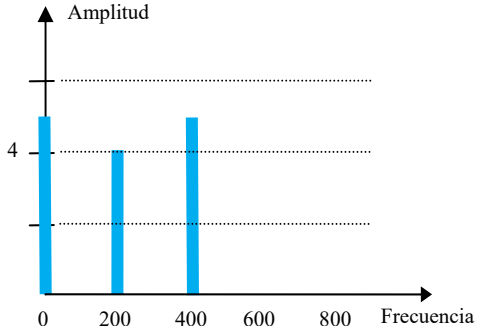
c) ¿Cuál sería la velocidad de transmisión si se están transmitiendo 4 bits por periodo de la señal?

Resolución:

a) El espectro de frecuencias:



b) El espectro de frecuencias después de aplicar el filtro:



c) A partir de $s(t)$, se obtiene la frecuencia fundamental, $f = 200\,\text{ciclos/s}$, por lo tanto, la velocidad de transmisión:

$$V_t = 200\,\text{ciclos/seg} \cdot 4\,\text{bits/ciclo} = 800\,\text{bps}$$

Ref: 2-B-10 Problema: 2.19

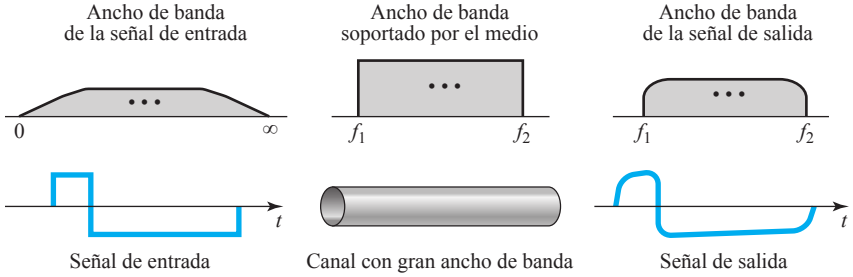
¿Por qué se utiliza una señal analógica para aproximar una señal digital?

Resolución:

Desde un punto de vista de ingeniería, el resultado de Fourier es impracticable para señales digitales ya que una representación exacta de una señal digital necesita de un conjunto infinito de señales seno, en su lugar, se puede utilizar una conversión aproximada de una señal de digital a analógica. Por lo tanto, los ingenieros construyen dispositivos para generar ondas analógicas que son muy parecidas a la señal digital.

Ref: 2-B-11 ☺☺ ? R Problema: 2.20

Cite algunos ejemplos de canal dedicado banda base.



Resolución:

Una transmisión banda base conforma un medio dedicado con un sólo canal, es decir, la totalidad del ancho de banda se dedica a un sólo canal.

Actualmente, la mayoría de LANs cableadas utilizan un canal dedicado para la comunicación entre estaciones:

- En topología bus con conexiones multipunto, sólo dos estaciones pueden comunicar entre sí en cada instante de tiempo, el resto de estaciones necesitan retenerse en el envío de datos.
- En topología estrella, la totalidad del canal entre cada estación y el hub se utiliza para la comunicación entre ambos dispositivos.

Ref: 2-B-13 Problema: 2.21

Sea un canal paso bajo de ancho de banda limitado utilizado para enviar 2 Mbps en banda base utilizando los armónicos primero y tercero.

a) ¿Cuál es el ancho de banda necesario para un canal?

b) Representa el diagrama de frecuencias.

c) Representa el ancho de banda del canal.

Resolución:

a) En transmisión digital, si T es el periodo de la señal, entonces, la velocidad de transferencia:

$$V_t = \frac{2}{T}$$
$$T = \frac{2\,\text{bits}}{2\,\text{Mbps}} = 1\,\mu\text{s}$$

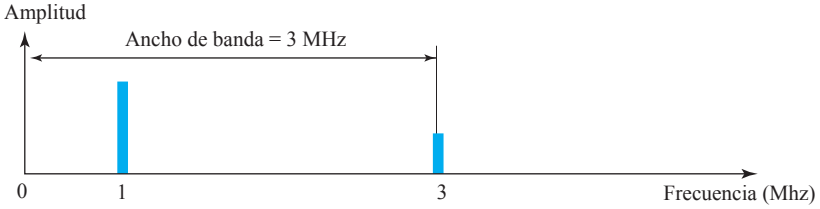
Por lo tanto, tenemos una frecuencia fundamental:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1\,\mu\text{s}} = 1\,\text{MHz}$$

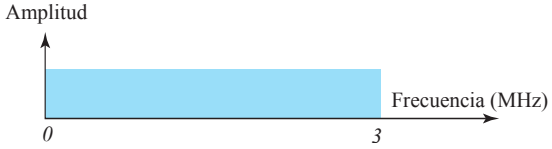
y como un canal paso bajo comienza en frecuencia 0, el ancho de banda necesario del canal:

$$B = 3f - 0 = 3f = 3 \cdot 1 = 3\,\text{MHz}$$

b) El diagrama de frecuencias:



c) El ancho de banda del canal:



Ref: 2-B-15 ☺☺ Problema: 2.22

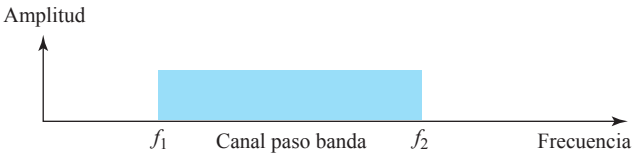
Tenemos un canal paso bajo con ancho de banda de 100 kHz. ¿Cuál es la tasa de datos máxima de este canal?

Resolución:

La tasa de datos máxima se puede conseguir si utilizamos sólo el primer armónico. Por tanto, la tasa en bits es 2 veces el ancho de banda disponible, por tanto, 200 kbps.

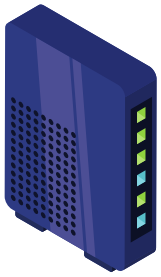
Ref: 2-B-16 ☺☺ ? R Problema: 2.23

Cite algunos ejemplos de canal banda ancha.



Resolución:

Un ejemplo de transmisión banda ancha utilizando modulación es el envío de datos procedentes de un computador a través de una línea telefónica, la línea que conecta a un residente con la oficina central de la telefónica. Estas líneas, instaladas hace muchos años, están diseñadas para transportar voz (una señal analógica) con un ancho de banda limitado (frecuencias entre 0 y 4 kHz). Aunque este canal se puede usar como un canal paso bajo, normalmente se considera un canal paso banda (banda ancha). Una razón es que el ancho de banda es tan estrecho (4 KHz) que si se trata el canal como un paso bajo y se usa transmisión banda base, la velocidad máxima que se puede conseguir es 8 kbps. La solución es considerarlo como un canal paso banda, convertir la señal digital del computador a señal analógica y enviar la señal analógica. Se pueden instalar convertidores de señal digital a analógica y viceversa en el receptor, denominados MODEM. Esboza el funcionamiento de la TV analógica en B/N desde el punto de vista de la transmisión de una señal analógica compuesta no-periódica.



Otro ejemplo es la telefonía móvil digital. Para aumentar la calidad de la recepción, los teléfonos móviles convierten la señal analógica de la voz a señal digital (digitalización PCM). Aunque el ancho de banda asignado a una compañía que proporciona servicios de telefonía móvil es muy grande, todavía no se puede enviar la señal digital sin conversión. La razón es que sólo hay disponible un canal paso banda entre dispositivo emisor y receptor. Por ejemplo, si el ancho de banda disponible es W y se permiten 1000 conversaciones simultáneamente, el canal disponible es $W/1000$, sólo parte del ancho de banda total. Es necesario convertir la señal digital de voz a una señal analógica compuesta antes de enviarla. Los teléfonos móviles convierten la señal analógica de audio a una digital y luego se convierte de nuevo a analógica para su transmisión por un canal paso banda.

Ref: 2-B-17 ☺☺ Problema: 2.24

Varias cuestiones:

a) ¿Qué es un armónico de una señal? ¿Qué relación tiene con el ancho de banda de la señal?

b) ¿Qué se obtiene con el análisis de Fourier de una señal compuesta?

c) ¿Existe alguna relación entre el ancho de banda de una señal y la representación de dicha señal con la serie de Fourier? Razone la respuesta.

d) ¿Cuál es la relación entre ancho de banda, frecuencia y calidad de una señal con el ancho de banda del canal de comunicaciones?

e) ¿Qué es el ancho de banda de una señal digital?

f) ¿Qué señal tiene un ancho de banda mayor, una señal sinusoidal de frecuencia 100 Hz o una señal sinusoidal con frecuencia 200 Hz?

Resolución:

a)

- Es una componente senoidal de dicha señal. Por medio de la superposición (o suma) de armónicos se puede lograr reproducir la señal (o una aproximación a la misma).
- El número de armónicos de la señal determinan el ancho de banda efectivo de la misma, ya que el ancho de banda de la señal se calcula como la diferencia de la frecuencia del armónico de mayor frecuencia y la frecuencia del armónico de menor frecuencia.

b) A partir del análisis de Fourier es posible descomponer una señal compuesta en las partes que la componen, un conjunto de funciones seno, cada una con su frecuencia, amplitud y fase.

c) Sí.

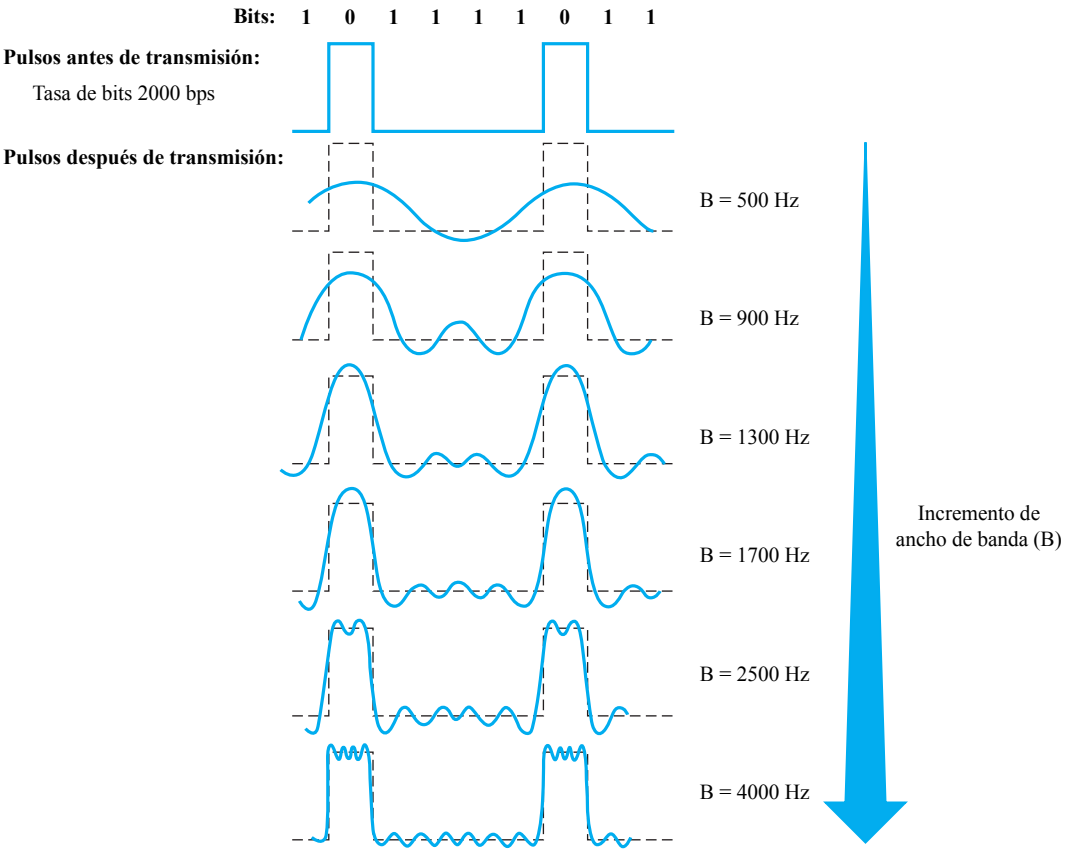
El ancho de banda de la señal viene determinado por las componentes espectrales más significativas de dicha señal y la serie de Fourier tiene un término senoidal por cada una de las componentes espectrales que constituyen la señal. Cuantos más términos de la serie de Fourier tengamos, más se parecerá a la señal ideal. Es decir, cuanto mayor sea el ancho de banda de la señal, mejor la podremos representar, porque habremos utilizado más términos de la suma de Fourier, acercándonos más a la señal original.

d)

- Si mantenemos el mismo número de armónicos de la señal y aumentamos la frecuencia de la señal, el ancho de banda de la señal será mayor, por lo que necesita un ancho de banda mayor en el canal de comunicaciones.
- Si, por el contrario, mantenemos la frecuencia pero tomamos más armónicos, la calidad de la señal transmitida será mejor, pero el ancho de banda de canal necesario también aumentará.

e) De acuerdo con el ancho de banda de una señal analógica, una señal digital tiene un ancho de banda infinito ya que el análisis de Fourier de una señal digital produce un conjunto infinito de señal seno con frecuencias que crecen hasta infinito.

f) Ambas señales son señales simples. El ancho de banda de una señal simple es cero. Por lo tanto, el ancho de banda de ambas señales es el mismo.


Bits: 1 0 1 1 1 1 0 1 1
Pulsos antes de transmisión:
Tasa de bits 2000 bps
Pulsos después de transmisión:
B = 500 Hz
B = 900 Hz
B = 1300 Hz
B = 1700 Hz
B = 2500 Hz
B = 4000 Hz
Incremento de ancho de banda (B)

Ref: 2-B-20 | | | | Problema: 2.25

Por un canal paso banda de 5000 Hz se transmiten caracteres de 8 bits, recibiendo en el extremo opuesto una señal de 25 armónicos con cuatro niveles de voltaje.

a) ¿Cuál es la velocidad de modulación de la línea?

b) ¿Cuántos carácteres recibirá en 10 segundos con la velocidad de modulación obtenida?

Resolución:

a) Si la señal digital está compuesta por 25 armónicos, indica que si f es la frecuencia fundamental, entonces, se han recibido los primeros 25 armónicos impares de la señal, es decir:

$$f, 3f, 5f, \cdots, 49f$$

Por lo tanto, si tenemos un ancho de banda de 5000 Hz, entonces:

$$\begin{aligned} 49f - f &= 5000 \\ 48f &= 5000 \\ f &= 104{,}2\,\text{Hz} \end{aligned}$$

que corresponde a la velocidad de modulación:

$$V_m = S = 104{,}2\,\text{baudios}$$

b) Si la señal tiene cuatro niveles de voltaje, entonces:

$$r = \log_2 4 = 2$$

por lo tanto, la tasa de bits:

$$N = rS = 2 \cdot 104{,}2 = 208{,}4\,\text{bps}$$

entonces, si cada carácter se codifica con 8 bits, en el extremo opuesto se habrán recibido:

$$n = \frac{10\,\text{s} \cdot 208{,}4\,\text{bps}}{8\,\text{bit/caracter}} \approx 260\,\text{caracteres}$$

Ref: 2-B-25	☺	?	R		Problema: 2.26

Cuestiones sobre señales analógicas periódicas y no periódicas:

a) Esboce cómo sería la representación temporal de una señal analógica periódica compuesta a partir de tres señales analógicas simples de frecuencias f, $3f$ y $9f$, por ejemplo, señales de alarma a diferentes frecuencias.

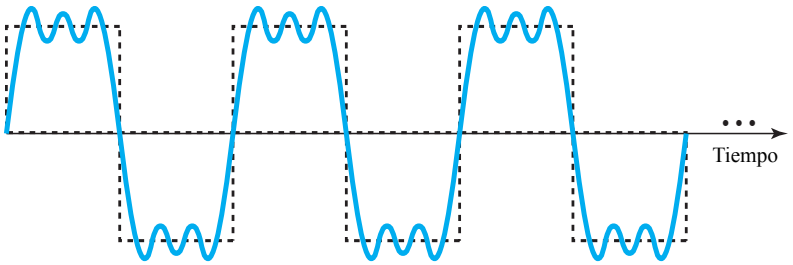
- Como señal analógica *parecida* a una señal cuadarada.
- Como descomposición de señales simples, representando tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

b) Esboce cómo sería la representación de una señal analógica no periódica compuesta y ponga un ejemplo de una señal de este tipo.

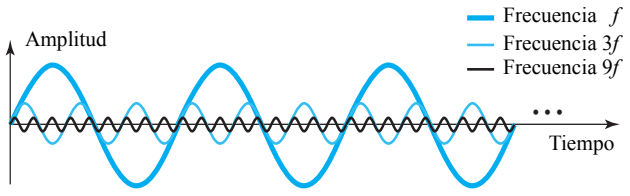
Resolución:

a) Señal analógica compuesta periódica:

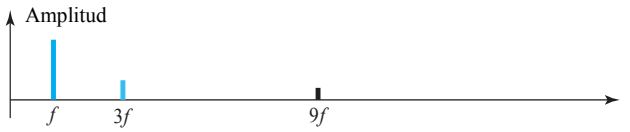
- Una señal analógica compuesta por diferentes armónicos es una onda *parecida* a una onda cuadrada:



- Cuya descomposición en señales simples, de frecuencias f, $3f$ y $9f$, correspondientes a cada una de las alarmas, representado en las siguientes gráficas temporales y frecuenciales, respectivamente:

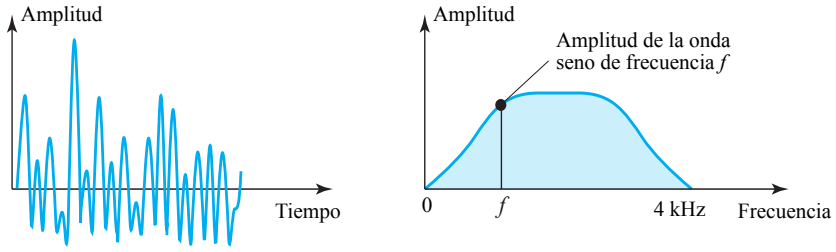


(a) Descomposición en el dominio del tiempo de una señal compuesta



(b) Descomposición en el dominio de frecuencias de una señal compuesta

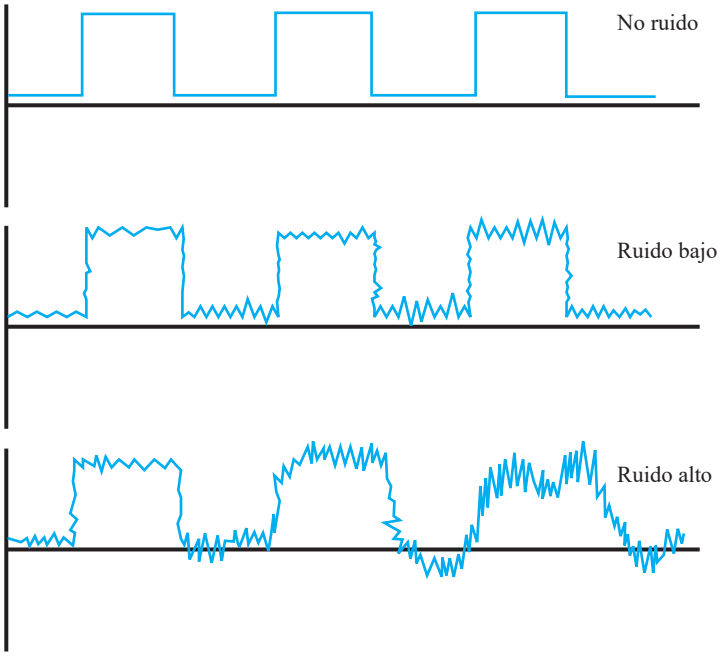
b) Señal analógica compuesta no periódica:



(a) Dominio del tiempo (b) Dominio de la frecuencia

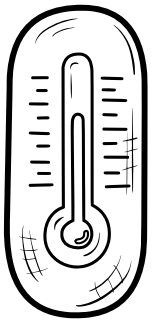
Esta señal podría ser creada por un micrófono o teléfono a partir de la pronunciación de una o dos palabras. En este caso, la señal nunca puede ser periódica, porque para que lo fuera, implicaría la repetición de la misma palabra o palabras exactamente con el mismo tono, duración, etc.

D



- Ruido blanco
- Constante de Boltzmann
- Relación señal a ruido

Ref: 2-D-01 ☺☺☺ Problema: 2.27



Dada una temperatura efectiva de 8000 °K, en un sistema con un ancho de banda de 4 MHz. Dato: $k = 1{,}3803 \times 10^{-23}$ J/K (Constante de Boltzmann). Expresa el nivel de ruido a la salida:

a) En watios

b) En decibelios

Resolución:

a) El ruido térmico viene definido por $N_0 = kT$ por cada ancho de banda $B = 1$ Hz:

$$N = kTB \tag{2.3}$$

donde:

- k, constante de Boltzmann, cuyo valor es $1{,}3803 \cdot 10^{-23}$ J/°K.
- T, temperatura efectiva, en este caso, 8000 °K.
- B, ancho de banda en Hertzios, en este caso, 4 MHz.

Por lo tanto, a partir de (2.27), se obtiene el ruido térmico, para un ancho de banda $B = 4$ MHz, expresado en watios:

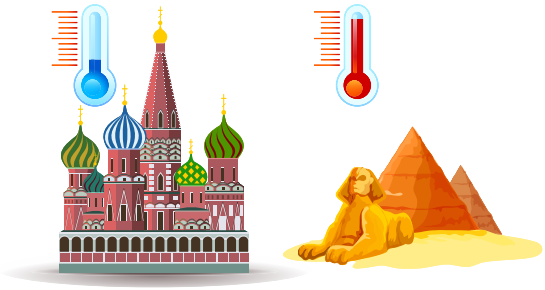
$$N = 1{,}3803 \cdot 10^{-23}\,\text{J/°K} \cdot 8000\,\text{°K} \cdot 4\,\text{MHz} = 4{,}417 \cdot 10^{-13}\,\text{W}$$

b) Expresado en dB:

$$N_{dB} = 10 \log N = 10 \log(4{,}417 \cdot 10^{-13}) = -123{,}548\,\text{dB}_\text{w}$$

Ref: 2-D-04 ☺☺☺ ? R Problema: 2.28

Se han implementado dos sistemas de comunicaciones de las mismas características en las ciudades de El Cairo y Moscú. Se comprueba que en ambos sistemas la *SNR* en el equipo receptor es idéntica. Supongamos que la temperatura en El Cairo es de unos 35 ºC y en Moscú de -10 ºC.



a) ¿Es posible determinar cuál de los equipos transmisores emite a una potencia mayor?

b) En caso de que la respuesta anterior sea afirmativa, indique cuál es la relación entre las potencias emitidas por cada uno de los transmisores.

Resolución:

a) A pesar de que los sistemas instalados en ambos lugares tienen las mismas características, el ruido térmico que afecta a ambos sistemas es distinto debido a que la temperatura es distinta. Por ello, para mantener la *SNR* constante, el lugar con mayor ruido térmico (aquel con una mayor temperatura), El Cairo en este caso, será el que requerirá que el equipo transmisor emita con una mayor potencia.

Para calcular la relación entre las potencias emitidas en ambos lugares por los equipos transmisores, empezamos planteando la condición de que la *SNR* es igual en ambos sistemas:

$$\frac{S_{\text{Cairo}}}{N_{\text{Cairo}}} = \frac{S_{\text{Moscú}}}{N_{\text{Moscú}}}$$

por lo que,

$$\frac{S_{\text{Cairo}}}{S_{\text{Moscú}}} = \frac{N_{\text{Cairo}}}{N_{\text{Moscú}}} = \frac{kT_{\text{Cairo}}B}{kT_{\text{Moscú}}B} = \frac{T_{\text{Cairo}}}{T_{\text{Moscú}}} = \frac{273+35}{273-10} = \frac{308}{263} = 1{,}17$$

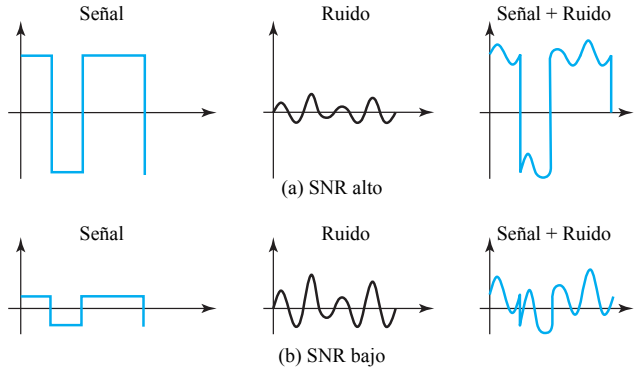
es decir, la potencia transmitida en El Cairo debe de ser un 17 % mayor que en Moscú:

$$S_{\text{Cairo}} = (1+0{,}17)\cdot S_{\text{Moscú}}$$

b) La relación anterior, expresada en dB:

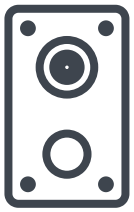
$$S_{\text{Cairo}} = 10\log(1{,}17\cdot S_{\text{Moscú}}) = S_{\text{Moscú}} + 10\log 1{,}17 = S_{\text{Moscú}} + 0{,}69$$

E



- Potencia de la señal
- Decibelio
- SNR y SNR_{dB}
- Atenuación
- Ganancia

Ref: 2-E-01 | Problema: 2.29



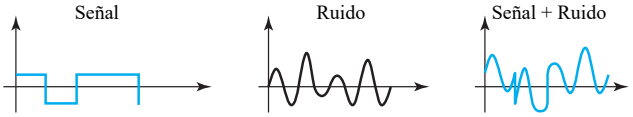
Calcula la potencia de una señal si $dB_m = -30$.

Resolución:

$$dB_m = 10 \log P_m$$
$$-30 = 10 \log P_m$$
$$P_m = 0{,}001\,\text{mW}$$

Ref: 2-E-02 | Problema: 2.30

La potencia de una señal es 10 mW y la potencia del ruido es 1 μW. ¿Cuáles son los valores de SNR y SNR_{dB}?



Resolución:

El SNR es una relación de potencias:

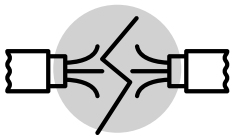
$$SNR = \frac{10000\,\mu\text{W}}{1\,\mu\text{W}} = 10^4$$

por lo tanto:

$$SNR_{dB} = 10\log 10^4 = 40\,\text{dB}$$

Ref: 2-E-03 | Problema: 2.31

Supongamos que una señal viaja a través de un medio conductor y su potencia se reduce a la mitad. ¿Cuál será su atenuación en dB?



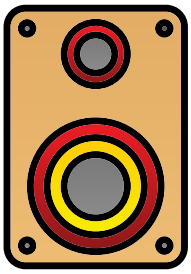
Resolución:

Sea P_1 la potencia inicial, si la potencia final P_2 es la mitad, entonces, $P_2 = \frac{1}{2}P_1$. En este caso, la atenuación (pérdida de potencia), calculada en dB:

$$A_{dB} = 10\log\frac{P_2}{P_1} = 10\log\frac{0{,}5P_1}{P_1} = 10\log 0{,}5 = -3\,\text{dB}$$

Una pérdida de 3 dB (-3 dB) es equivalente a la pérdida de la mitad de la potencia de la señal.

Ref: 2-E-04 | Problema: 2.32



Supongamos que una señal viaja a través de un amplificador y su potencia se amplifica un factor de 10. ¿Cuál será la ganancia de la señal, expresada en dB?

Sol: 10 dB

Ref: 2-E-06 | Problema: 2.33

¿Cuál es el valor de SNR y SNR_{dB} en un canal perfecto?

Resolución:

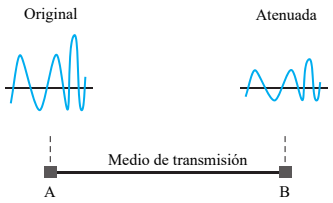
Un canal perfecto considera un canal sin ruido, por lo tanto, si S es la pontencia de señal y N es la potencia de ruido. Si consideramos $N = 0$, entonces:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S}{0} = \infty$$

luego:

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR = 10 \log \infty = \infty$$

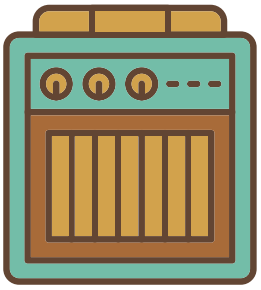
Ref: 2-E-07 | Problema: 2.34



Una señal viaja desde el punto A al B. En el punto A, la potencia de la señal es 100 W. En el punto B, la potencia es de 90 W. ¿Cuál es la atenuación en decibelios?

Sol: $\approx -0{,}46\,\mathrm{dB}$

Ref: 2-E-09 | ☺☺☺ | Problema: 2.35



Una señal ha pasado a través de tres amplificadores en cascada, cada uno de ellos con una ganancia de 4 dB.

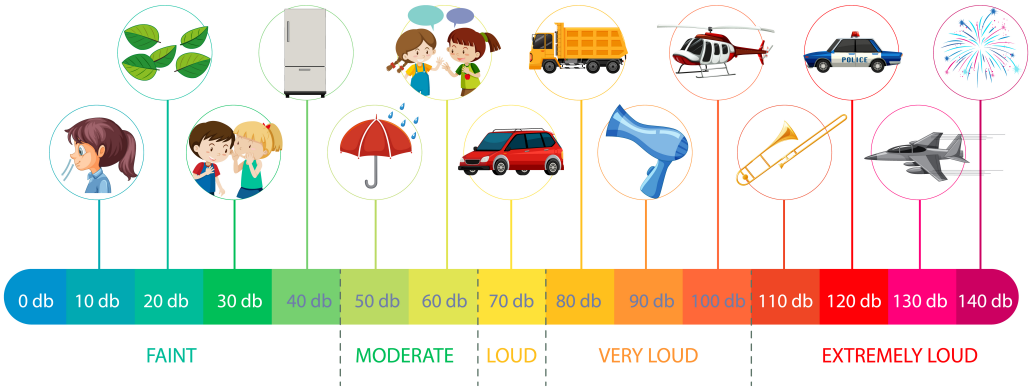
a) ¿Cuál es la ganancia total?

b) ¿Cuánto ha sido amplificada la señal?

Sol: *a*) 12 dB *b*) $\approx \cdot 16$

Ref: 2-E-10 ☺☺ ? R Problema: 2.36

Completa la siguiente tabla:



Decibelios	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Pérdida			0,5							0,1
Ganancia			2							10

Resolución:

- Pérdida → $-3\,\text{dB}$:

$$10\log x = -3$$
$$x = 10^{-0,3} = 0,501 \approx 0,5$$

- Ganancia → $3\,\text{dB}$:

$$10\log x = 3$$
$$x = 10^{0,3} = 1,995 \approx 2$$

Por lo tanto:

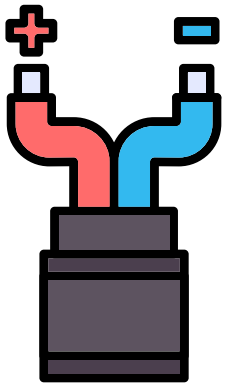
Decibelios	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Pérdida	0,8	0,63	0,5	0,4	0,32	0,25	0,2	0,16	0,125	0,1
Ganancia	1,25	1,6	2	2,5	3,2	4,0	5,0	6,3	8,0	10

Ref: 2-E-17 Problema: 2.37

Si un sistema tiene un nivel de potencia de entrada y salida de 9000 mW y 3000 mW, respectivamente, ¿cuál es la diferencia expresada en dB?

Sol: $\approx -4{,}77\,\mathrm{dB}$

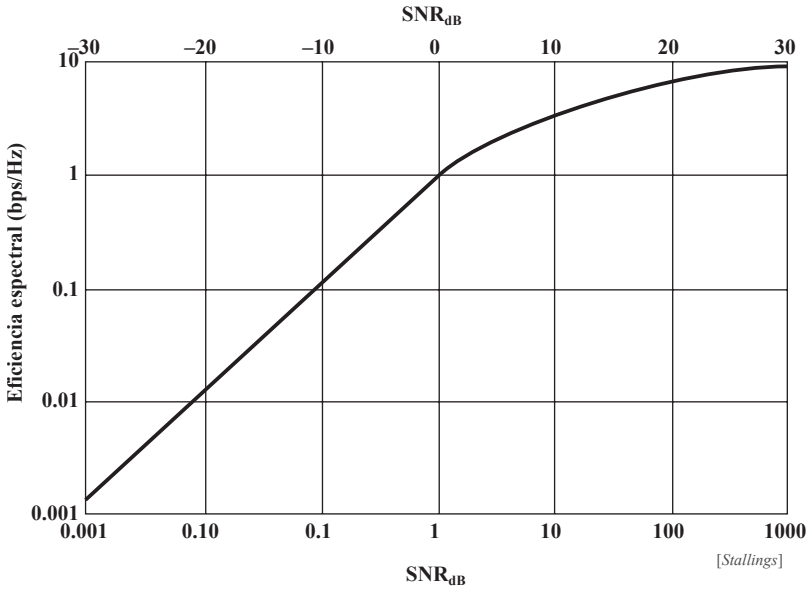
Ref: 2-E-21 | ☺☺☺ | Problema: 2.38



Al transmitir una señal a través de un cable sufre una atenuación de 10 dB. Si necesito recibir en un extremo 2 W de potencia, ¿cuántos dB_m deberá tener la señal que se envíe en el otro extremo?

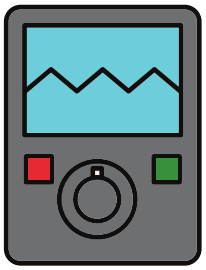
Sol: 43 dBm

F



- □ Limitaciones a la tasa de datos
- □ Capacidad del canal
- □ Niveles de una señal
- □ Teorema de Nyquist
- □ Teorema de Shannon

Ref: 2-F-01 ☺☺ Problema: 2.39



Sea un canal de 1 MHz de ancho de banda, un *SNR* de 63. Determina:

a) Tasa en bits máxima que puede soportar el canal.

b) Nº de niveles de señal necesarios para proporcionar la tasa de bits anterior.

Resolución:

a) Si B es el ancho de banda y SNR es la relación señal a ruido, entonces, a partir de Shannon, obtenemos la capacidad máxima del canal:

$$C = B\log_2(1 + SNR) = 10^6 \log_2(1 + 63) = 6\,\text{Mbps}$$

b) Si L es el número de niveles de la señal, entonces, a partir de Nyquist:

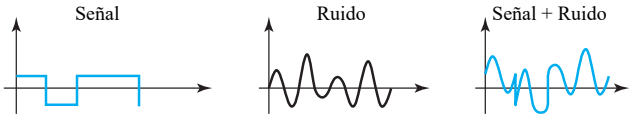
$$C = 2B\log_2 L$$

siendo el número de niveles necesarios:

$$L = 2^{\frac{C}{2B}} = 2^{\frac{6\,\text{Mbps}}{2\,\text{MHz}}} = 8\,\text{niveles}$$

Ref: 2-F-02 Problema: 2.40

Supongamos un canal extremadamente ruidoso, donde la relación señal-a-ruido está cercano a cero (el ruido es mucho mayor que la señal). ¿Cuál será la capacidad del canal?



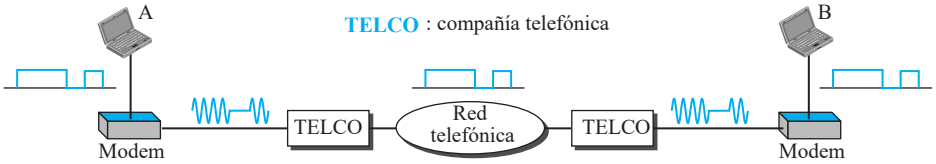
Resolución:

Si B es el ancho de banda del canal y $SNR \approx 0$ la relación señal a ruido, entonces, según el Teorema de Shannon, la capacidad del canal:

$$C = B \log_2(1 + SNR) = B \log_2(1 + 0) = B \log_2 1 = B \cdot 0 = 0 \,\text{bps}$$

Lo que significa que la capacidad de un canal extremadamente ruidoso es cero, independientemente de su ancho de banda $\Rightarrow$ No es posible recibir datos a través de ese canal.

Ref: 2-F-03 | Problema: 2.41



Sea la línea telefónica regular con un ancho de banda de 3000 Hz (de 300 a 3300 Hz) para transmisión de datos. Una medida habitual de la *SNR* está alrededor de 3162.

a) ¿Cuál será la capacidad máxima teórica de un canal de línea telefónica?

b) ¿Cómo se podría aumentar la tasa de bits del canal?

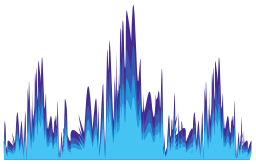
Resolución:

a) La tasa máxima a través de un medio, en presencia de ruido, se obtiene a partir del Teorema de Shannon. Si B es el ancho de banda del canal y SNR relación señal a ruido, entonces, la capacidad máxima del canal telefónico indicado:

$$C = B \log_2(1 + SNR) = 3000 \log_2(1 + 3162) = 34860 \text{ bps}$$

b) Aumentando B o disminuyendo SNR.

Ref: 2-F-04 ☺☺ ? R Problema: 2.42



Sea un canal con una relación señal-a-ruido de $SNR_{dB} = 36$ y ancho de banda de 2 MHz. ¿Cuál será la capacidad teórica máxima del canal?

Resolución:

Primero necesitamos calcular SNR a partir de SNR_{dB},

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR$$

por lo tanto:

$$SNR = 10^{SNR_{dB}/10} = 10^{3,6} \approx 3981$$

y, mediante Shannon, si B es el ancho de banda del canal y SNR relación señal a ruido, entonces, la capacidad teórica del canal:

$$C = B \log_2(1 + SNR) = 2 \cdot \log_2(1 + 3981) \approx 24\,\text{Mbps}$$

Ref: 2-F-06 | Problema: 2.43

Supongamos que necesitamos enviar a una tasa de bit de 265 kbps sobre un canal perfecto con un ancho de banda de 20 kHz. ¿Cuántos niveles de señal necesitaremos?

Resolución:

Si L es el número de niveles, B es el ancho de banda y C la capacidad del medio, entonces, partir de la expresión de Nyquist:

$$C = 2B \log_2 L$$

por lo tanto:

$$L = 2^{\frac{C}{2B}} = 2^{\frac{265\,\text{kbps}}{2 \cdot 20\,\text{kHz}}} = 98{,}7\,\text{niveles}$$

Evidentemente, el nº de niveles de una señal debe ser un valor discreto, y además, potencia de 2. Por lo tanto, necesitamos incrementar el número de niveles o decrementar la tasa de bits, entonces:

- Si establecemos 128 niveles → es necesario subir la tasa de bits a 280 kbps.
- Si establecemos 64 niveles → la tasa de bits necesaria disminuye a 240 kbps.

Ref: 2-F-11 ☺☺☺ ? R Problema: 2.44

Se pretende implementar un sistema de comunicaciones que tenga una eficiencia espectral superior a 2,5 bits/Hz.

a) ¿Cuál es el número mínimo de niveles de señal que se deben emplear?

b) ¿Cuál es la eficiencia espectral a partir de la cual se requieren más de dos niveles?

Resolución:

a) Si B es el ancho de banda y L es el número de niveles de la señal, entonces, el límite de la velocidad de transmisión viene definido por el Teorema de Nyquist:

$$C = 2B \log_2 L$$

de donde obtenemos la eficiencia espectral:

$$\frac{C}{B} = 2 \log_2 L$$

Por lo tanto, para obtener una eficiencia espectral (C/B) superior a 2,5 bits/Hz, se tiene que cumplir:

$$\frac{C}{B} = 2 \log_2 L > 2{,}5$$

Por lo que:

$$L > 2^{1{,}25} = 2{,}38 \rightarrow 3$$

En consecuencia, deberán utilizarse, al menos, tres niveles para conseguir la eficiencia espectral deseada.

b) La máxima eficiencia espectral que puede conseguirse con dos niveles es:

$$\frac{C}{B} = 2 \log_2 2 = 2 \text{ bps/Hz}$$

Por lo tanto, para conseguir una eficiencia espectral superior a 2 es necesario utilizar más de dos niveles.

Ref: 2-F-12 | ☺☺ | | Problema: 2.45

¿Cuál es la eficiencia espectral máxima que se puede conseguir con una *SNR* de 0 dB (cuando la potencia de señal es igual a la potencia de ruido)?

Sol: 1 bps/Hz

Ref: 2-F-33 ☺☺☺ ? R Problema: 2.46

¿Cómo varía la capacidad máxima de un canal de comunicaciones con el *SNR* para un ancho de banda del canal constante? Dar algunos valores.

Resolución:

Sea B el ancho de banda, C la capacidad máxima del canal y SNR es la relación señal a ruido.Teniendo en cuenta la fórmula de Shannon:

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

A mayor SNR, mayor capacidad del canal, es decir, la capacidad del canal es directamente proporcional al cociente SNR. Sabemos que cuanto mayor sea el cociente SNR, más fácil es distinguir qué es señal y qué es ruido (la potencia de la señal es significativamente mayor que la del ruido), por lo que es importante que este cociente sea grande para poder extraer la señal en el receptor. Por ejemplo:

- Si tenemos un $SNR_{dB} = 30\,\text{dB}$ y $B = 3100\,\text{Hz}$:

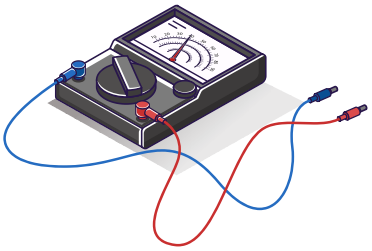
$$C_1 = 3100 \log_2(1 + 1000) = 30898\,\text{bps}$$

- Si tenemos un $SNR_{dB} = 0\,\text{dB}$ y $B = 3100\,\text{Hz}$:

$$C_2 = 3100 \log_2(1 + 1) = 3100\,\text{bps}$$

Observamos que $C_1 \gg C_2$.

Ref: 2-F-71 ☺☺☺☺ Problema: 2.47

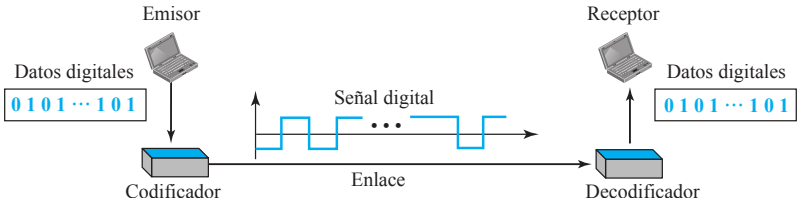


Un sistema de comunicaciones transmite una señal de 0 a 1 voltio con posibilidad de distinguir variaciones de 3,9 mV. La separación entre dos pulsos consecutivos es de 1 ms. Suponiendo el caso más favorable, calcula:

a) Velocidad de modulación (velocidad de símbolos)
b) Ancho de banda
c) Capacidad máxima de transmisión de datos

Sol: *a*) 1 kbaudio *b*) 0,5 kHz

G

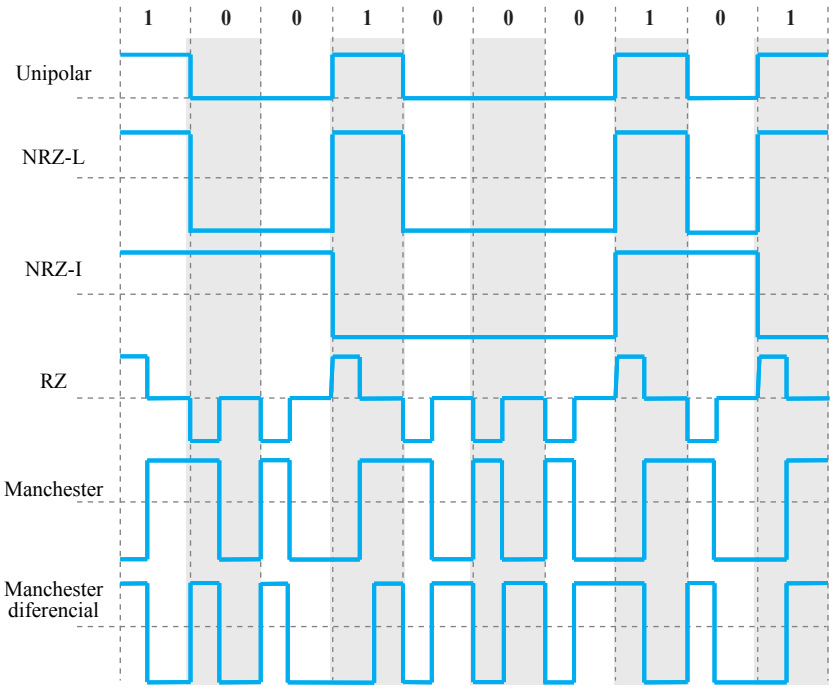


- Codificación digital:
- Codificación en línea: NRZ, RZ MLT-3, Manchester, AMI, etc
- Codificación en bloque: 4B/5B, etc.
- Tasa digital
- Tasa de símbolos
- Violación de código

Ref: 2-G-01 | Problema: 2.48

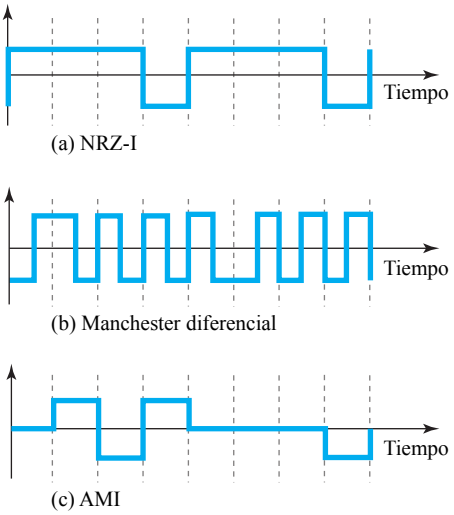
Codificar la secuencia binaria 10 0100 0101 en los esquemas de codificación siguientes: Unipolar (positivo), NRZ-L, NRZ-I (considerar el bit previo en nivel *bajo*), RZ, Manchester y Manchester Diferencial.

Resolución:



Ref: 2-G-10 ☺☺ Problema: 2.49

Encuentra las secuencias de datos de 8 bits para cada uno de los casos de la figura.



Sol: *a*) 1001 1001 *b*) 1100 0100 *c*) 0111 0001

Ref: 2-G-11 ☺☺ Problema: 2.50

A partir del esquema de sustitución 4B/5B definido en la siguiente tabla:

[*Forouzan*]

Secuencia de datos	Secuencia codificada	Secuencia de control	Secuencia codificada
0000	11110	Q (Quiet)	00000
0001	01001	I (Idle)	11111
0010	10100	H (Halt)	00100
0011	10101	J (Start delimiter)	11000
0100	01010	K (Start delimiter)	10001
0101	01011	T (End delimiter)	01101
0110	01110	S (Set)	11001
0111	01111	R (Reset)	00111
1000	10010		
1001	10011		
1010	10110		
1011	10111		
1100	11010		
1101	11011		
1110	11100		
1111	11101		

Dada la secuencia de entrada a un codificador de bloque 4B/5B:

0100 0000 0000 0000 0000 0001

a) ¿Cuál es la secuencia de salida?

b) ¿Cuál es la longitud de la secuencia más larga de 0s en la entrada?

c) ¿Cuál es la longitud de la secuencia más larga de 0s en la salida?

Sol: *a*) 01010 11110 11110 11110 11110 01001 *b*) 21 *c*) 2

Ref: 2-G-12 ☺☺ ? R Problema: 2.51

En relación a la codificación digital en línea:

a) ¿A qué se refieren las técnicas de *scrambling*?

b) Enumera las técnicas de *scrambling* que conoces.

c) Codifica la secuencia 11 1000 0000 0000 utilizando las diferentes técnicas de *scrambling*.

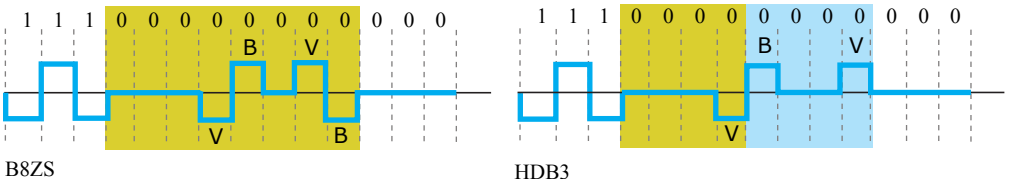
Nota: cuando sea necesario, suponer que el último nivel de señal no-cero ha sido positivo y que el número de pulsos no-cero es impar después de la última sustitución.

Resolución:

a) Con las técnicas de *scrambling*, se codifican las cadenas de 0s introduciendo pulsos adicionales (violaciones de código) siguiendo ciertas reglas.

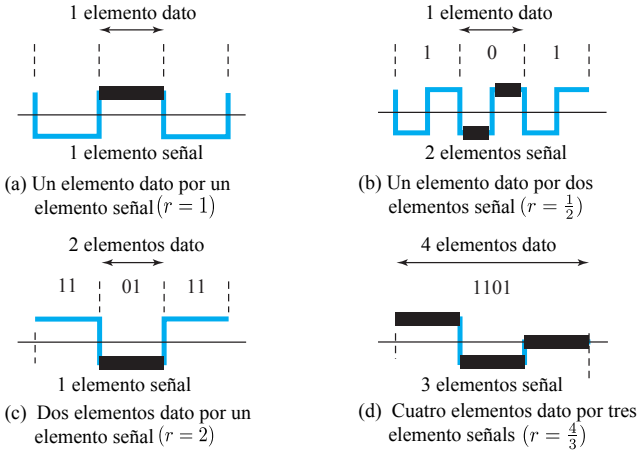
b) B8ZS y HDB3.

c) La secuencia codificada corresponde a:



Ref: 2-G-16 | Problema: 2.52

Calcula la tasa de señal para cada uno de los siguientes casos, suponiendo tasa de datos de 1 Mbps y $c = 1/2$.



(a) Un elemento dato por un elemento señal $(r = 1)$

(b) Un elemento dato por dos elementos señal $(r = \frac{1}{2})$

(c) Dos elementos dato por un elemento señal $(r = 2)$

(d) Cuatro elementos dato por tres elemento señals $(r = \frac{4}{3})$

Resolución:

Sabiendo que $c = 1/2$, utilizamos la expresión:

$$S = c \cdot N \cdot \frac{1}{r}$$

a) $r = 1$

$$S = \frac{1}{2} \cdot 1\,\text{Mbps} \cdot \frac{1}{1} = 500\,\text{kbaud}$$

b) $r = 1/2$

$$S = \frac{1}{2} \cdot 1\,\text{Mbps} \cdot \frac{1}{1/2} = 1\,\text{Mbaud}$$

c) $r = 2$

$$S = \frac{1}{2} \cdot 1\,\text{Mbps} \cdot \frac{1}{2} = 250\,\text{kbaud}$$

d) $r = 4/3$

$$S = \frac{1}{2} \cdot 1\,\text{Mbps} \cdot \frac{1}{4/3} = 375\,\text{kbaud}$$

Ref: 2-G-17 Problema: 2.53

Sea un canal banda-base con un 1 MHz de ancho de banda. ¿Cuál es la tasa de datos del canal si utilizamos cada uno de los siguientes esquemas de codificación en línea? Suponemos $c = 1/2$.

a) NRZ-L

b) Manchester

c) MLT-3

d) 2B1Q

Resolución:

Sea B el ancho de banda, N la tasa de bits, r relación de datos por símbolo y factor de línea $c = 1/2$, entonces:

$$B = c \cdot N \cdot \frac{1}{r}$$

a) $r = 1$

$$N = 2B = 2 \cdot 1\,\text{MHz} = 2\,\text{Mbps}$$

b) $r = 1/2$

$$N = B = 1 \cdot 1\,\text{MHz} = 1\,\text{Mbps}$$

c) $r = 1$

$$N = 3B = 3 \cdot 1\,\text{MHz} = 3\,\text{Mbps}$$

d) $r = 2$

$$N = 4B = 4 \cdot 1\,\text{MHz} = 4\,\text{Mbps}$$

Ref: 2-G-18 Problema: 2.54

¿Cuál es el ancho de banda necesario para conseguir una tasa de transmisión de B bits/s si la señal se transmite utilizando los siguientes esquemas de codificación?

a) NRZ

b) MLT-3

c) Manchester

Resolución:

a) En NRZ, la señal completa un ciclo, como máximo, cada 2 bits (1s y 0s alternativos). Por tanto, el ancho de banda mínimo es $B/2$ Hz.

b) En MLT-3, la señal completa un ciclo, como máximo, cada 4 bits (una secuencia de 1s), por tanto, requiere un ancho de banda mínimo de $B/4$ Hz.

c) En Manchester, la señal completa un ciclo en cada bit, por tanto, requiere como mínimo B Hz.

Ref: 2-G-20 Problema: 2.55

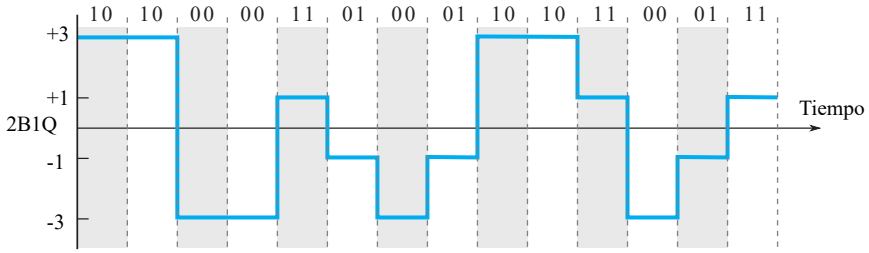
Dada la codificación 2B1Q definida por:

Binario	Nivel
00	-3
01	-1
10	+3
11	+1

Obtener la codificación 2B1Q de la secuencia binaria:

1010 0000 1101 0001 1010 1100 0111

Resolución:



Ref: 2-G-25 ☺☺☺ Problema: 2.56

¿Cuál es la capacidad de un circuito digital con una tasa de símbolos de 10 Mbaudios utilizando los siguientes esquemas de codificación digital: NRZ, RZ, Manchester, 2B1Q, MLT-3?

Resolución:

Codificación	Detalle	Capacidad
NRZ	Tasa de datos es ×2 tasa de símbolos	20 Mbps
RZ, Manchester	Tasa de datos igual a tasa de símbolos	10 Mbps
2B1Q, MLT-3	Tasa de datos es ×4 tasa de símbolos	40 Mbps

Ref: 2-G-26 Problema: 2.57

¿Cuál es la tasa de símbolos de un circuito digital a 100 Mbps para cada una de los siguientes esquemas de codificación digital: NRZ, RZ, Manchester, 2B1Q, MLT-3?

Resolución:

Codificación	Detalle	Capacidad
NRZ	Tasa de simbolos es 1/2 tasa de datos	50 Mbaudios
RZ, Manchester	Tasa de simbolos es igual a tasa de datos	100 Mbaudios
2B1Q, MLT-3	Tasa de simbolos es 1/4 tasa de datos	25 Mbaudios

Ref: 2-G-32 ☺☺☺ ? R Problema: 2.58

Realiza la codificación 4B/5B, y al resultado, aplica la codificación NRZ-I, de la siguiente secuencia binaria:

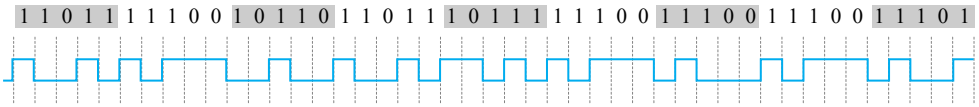
1101 1110 1010 1101 1011 1110 1110 1111

Resolución:

A partir de un esquema de conversión 4B/5B, una posible codificación sería:

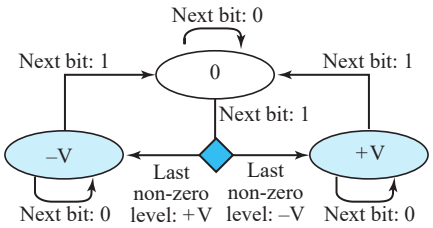
11011 11100 10110 11011 10111 11100 11100 11100 11101

finalmente, la codificación NRZ-I, quedaría:



Ref: 2-G-37 ☺☺☺ ? R Problema: 2.59

En la figura adjunta se aporta el diagrama de flujo de la codificación MLT-3, utilizada en Ethernet.



A partir de dicho diagrama de flujo, representa la codificación MLT-3 para la siguientes secuencias binarias:

a) 0101 1011

b) 1111 1111

c) 0101 0101

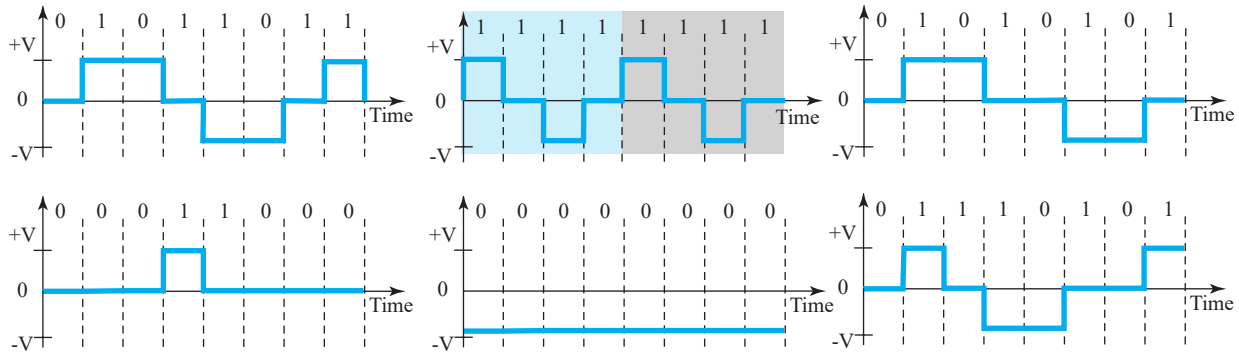
d) 0001 1000

e) 0000 0000

f) 0111 0101

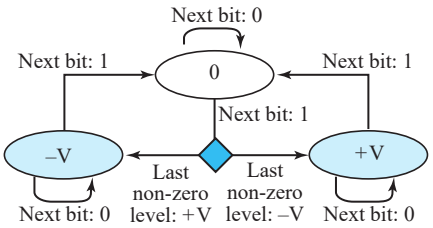
Nota: El estado inmediatamente anterior es 0, y el último estado, distinto de 0, ha sido `-V`.

Resolución:



Ref: 2-G-38 ☺☺☺ ? R Problema: 2.60

En la figura adjunta se aporta el diagrama de flujo de la codificación MLT-3, utilizada en Ethernet.

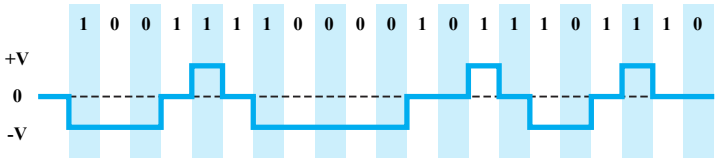


A partir de dicho diagrama de flujo, representa la codificación MLT-3 para la siguiente secuencia:

1 0011 1100 0010 1110 1110

Nota: Suponemos que el último estado distinto de 0 es `+V`.

Resolución:

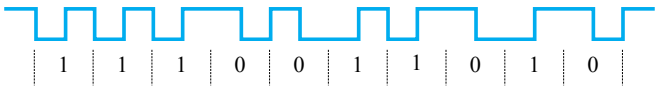


Ref: 2-G-42 | Problema: 2.61

Sea la onda cuadrada en codificación Manchester de una secuencia binaria. Determine el inicio y fin de cada periodo de bit, lo que corresponde a extraer la información de reloj y obtener la secuencia de datos.

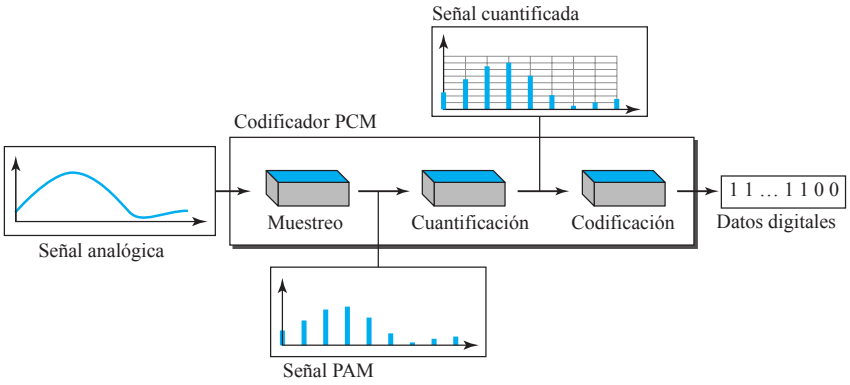
Resolución:

En codificación Manchester, siempre hay transición a mitad del intervalo. Por lo tanto:



Luego la secuencia codificada es: `11 1001 1010`.

H



- Conversión analógico-digital
- PCM
- Muestreo, cuantización, niveles
- Ruido
- Frecuencia de Nyquist
- Modulación Delta

Ref: 2-H-01 | Problema: 2.62

Dado un sistema de telefonía analógica que emplea un ancho de banda de 4 kHz y SNR de 50 dB. ¿Qué SNR_{dB} percibirá un usuario si se digitalizan y transmiten los datos utilizando una codificación que logra transmitir a la tasa máxima fijada por el Teorema de Shannon?

Resolución:

Según el teorema de Shannon, la tasa máxima a la que se puede transmitir utilizando un canal de 4 kHz y con una SNR de 50 dB:

$$R_{\text{máx}} = C = B \log_2(1 + SNR) = 4\,\text{kHz} \cdot \log_2(1 + 10^{\frac{50}{10}}) = 66{,}438\,\text{kbps}$$

Dado que al digitalizar la voz es necesario emplear una frecuencia de muestreo mayor o igual a dos veces la máxima frecuencia de la señal (Teorema del muestreo), por tanto, hay que muestrear a 8 kHz, el número de bits por muestra del que dispondrá:

$$n_b = \frac{R_{\text{máx}}}{f_s} = \frac{66{,}438\,\text{kbps}}{8000\,\text{muestras/s}} = 8{,}3\,\text{bits/muestra} \rightarrow n_b = 9\,\text{bits/muestra}$$

Finalmente:

$$SNR_{dB} = 6{,}02 n_b + 1{,}76 = 6{,}02 \cdot 9 + 1{,}76 \approx 56\,\text{dB}$$

Ref: 2-H-02 ☺☺ Problema: 2.63

¿Cuál es la relación ruido de señal-a-cuantificación en una digitalización PCM utilizando 10 bits por muestra?

Sol: 61,96 dB

Ref: 2-H-03 ☺☺☺ ? R Problema: 2.64

Consideremos una señal de audio con un espectro de frecuencias en el rango 300-3000 Hz. Supongamos una tasa de muestreo de 7000 muestras/s utilizada para generar la señal PCM.

a) Para una SNR = 30 dB, ¿cuál es el número de niveles de cuantificación máximo necesario?

b) ¿Qué tasa de datos es necesaria?

Resolución:

a) Si n_b es el número de bits por muestra, utilizados para la definición de los niveles de cuantificación:

$$SNR_{dB} = 6{,}02 n_b + 1{,}76$$

$$n_b = \frac{SNR_{dB} - 1{,}76}{6{,}02} = \frac{30 - 1{,}76}{6{,}02} = 4{,}69 \rightarrow n_b = 5\,\text{bit/muestra}$$

por lo tanto:

$$n_b = 5 \rightarrow 2^5 = 32 \text{ niveles}$$

b)

$$R = 7000\,\text{muestras/s} \cdot 5\,\text{bits/muestra} = 35\,\text{kbps}$$

Ref: 2-H-05 ☺☺ Problema: 2.65

¿Cuál es la tasa de datos máxima de un canal con un ancho de banda de 200 kHz si utiliza cuatro niveles para la digitalización de la señal?

Sol: 800 kbps

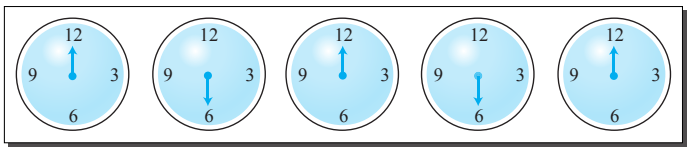
Ref: 2-H-07 ☺☺ ? R Problema: 2.66

Las hélices de un helicótero giran en el sentido de las aguas del reloj. En la película Apocalypse Now, (Francis Ford Coppola, 1979), cuando los helicópteros volaban hacia el enemigo, vemos como las hélices giran al revés. Supongamos que la película está grabada a 12 fotogramas por segundo y que la hélice gira unas 500 veces por segundo. Explica a qué puede ser debido este efecto visual.

Resolución:

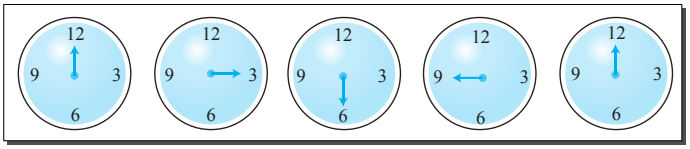
- Es debido al inframuestreo. La hélice gira más de 12 veces por segundo, por lo que, el *inframuestreo* crea la impresión de la rotación hacia atrás.
- Si la hélice girara justo 12 veces por segundo, crearía la impresión de estar parada en el aire.
- Para observar un movimiento correcto, la frecuencia de fotogramas debería ser mayor del doble de la frecuencia de giro de la hélice del helicóptero.

Ocurre exactamente igual con el ejemplo del reloj:



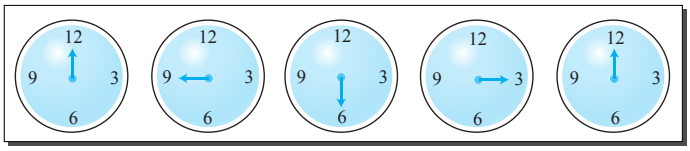
Las muestras pueden indicar que el reloj se está moviendo hacia delante o hacia atrás (12-6-12-6-12)

(a) Muestreo a tasa de Nyquist: $T_s = T\frac{1}{2}$



Las muestras indican que se está moviendo hacia delante. (12-3-6-9-12)

(b) Sobremuestreo (superior a tasa de Nyquist): $T_s = T\frac{1}{4}$



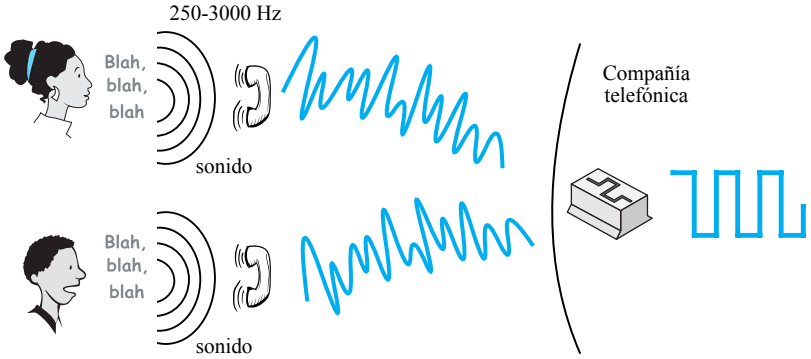
Las muestras indican que se está moviendo hacia atrás. (12-9-6-3-12)

(c) Inframuestreo (inferior a tasa de Nyquist): $T_s = T\frac{3}{4}$

[Forouzan]

Ref: 2-H-08	☺☺	?	R		Problema: 2.67

¿Por qué las compañías telefónicas digitalizan la voz a una tasa de muestreo de 8000 muestras/seg?

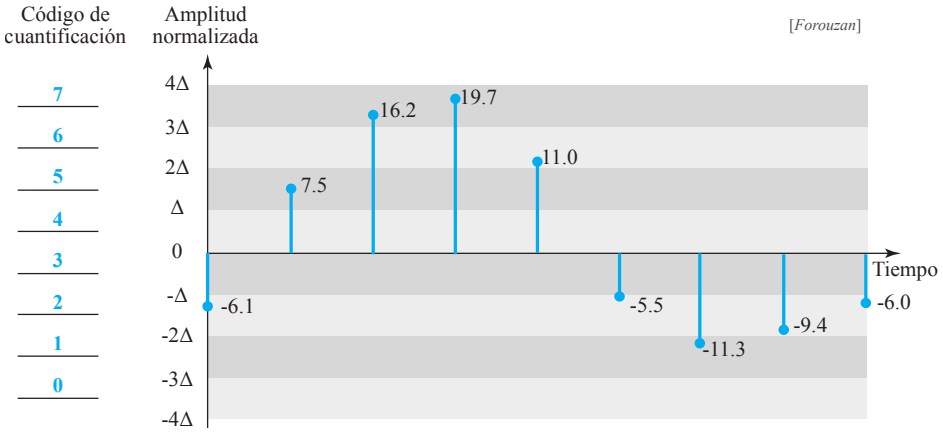


Resolución:

Porque la voz humana se encuentra en el espectro de frecuencias de 250-3000 Hz, por lo que asumen una frecuencia máxima de 4000 Hz, y por lo tanto, la frecuencia de Nyquist es el doble, 8000 Hz.

Ref: 2-H-09 ☺☺☺ Problema: 2.68

A partir de la señal analógica de la figura, considerando PCM, los intervalos indicados y el muestreo indicado.



a) Para cada una de las muestras, calcular: valor PAM normalizado, valor cuantificado normalizado, error normalizado, código de cuantificación, codeword.

b) ¿Cuál es la secuencia digital obtenida?

c) ¿Cuál es el valor de SNR_{dB} de la señal analógica digitalizada de la figura?

Sol: *a*) - *b*) 010 101 111 111 110 010 001 010 010 *c*) 19,28 dB

Ref: 2-H-11 ☺☺ ? R Problema: 2.69

Una línea telefónica debe tener un SNR_{dB} por encima de 40. ¿Cuál es el número mínimo de bits por muestra?

Resolución:

Si n_b es el número de bits por muestra, utilizados para la definición de los niveles de cuantificación:

$$SNR_{dB} = 6{,}02 n_b + 1{,}76\,\text{dB}$$

Por lo tanto:

$$n_b = \frac{SNR_{dB} - 1{,}76}{6{,}02} = \frac{40 - 1{,}76}{6{,}02} = 6{,}35$$

Las compañías telefónicas, normalmente, asignan 7 u 8 bits por muestra.

Ref: 2-H-12 ☺☺ ? R Problema: 2.70

Se quiere digitalizar la voz humana. ¿Cuál es la tasa de bits necesaria asumiendo 8 bits por muestra?

Resolución:

Si suponemos que la voz humana contiene frecuencias entre 0-4000 Hz, entonces, la tasa de muestreo:

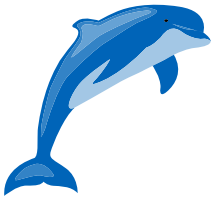
$$f_s = 2f_{\text{máx}} = 8000\,\text{muestras/s}$$

Si n_b es el número de bits por muestra, utilizados para la definición de los niveles de cuantificación, entonces, la tasa de bits:

$$N = f_s n_b = 8000\,\text{muestras/s} \cdot 8\,\text{bit/muestra} = 64\,\text{kbps}$$

Ref: 2-H-13 ☺☺ Problema: 2.71

¿Qué tasa de bit sería necesaria para digitalizar los sonidos del delfín con 8 bits por muestra si sabemos que emiten en la banda de ultrasonidos, en torno a los 160 kHz?



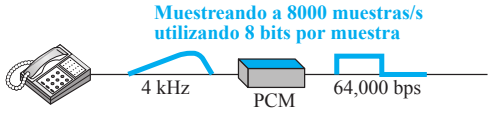
Sol: 2,56 Mbps

Ref: 2-H-15 ☺☺ ? R Problema: 2.72

¿Por qué en PCM se establece un tiempo de muestreo de 1,25 μs?

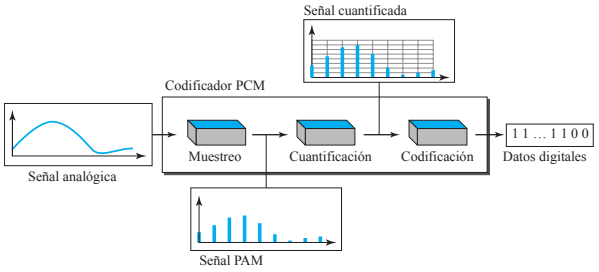
Resolución:

El tiempo de muestreo de 1,25 μs corresponde a 8000 muestras/s. Según el teorema de Nyquist, corresponde a la frecuencia de muestreo necesaria para capturar toda la información de un canal de 4 kHz (canal telefónico).



Ref: 2-H-16 | Problema: 2.73

Un canal de voz digitalizado se implementa mediante una digitalización de la señal de voz analógica a 4 kHz de ancho de banda. Es necesario muestrear la señal dos veces a la frecuencia más alta (dos muestras por hertz), y suponiendo que cada muestra necesita 8 bits. ¿Cuál es la tasa de bits necesaria?



Resolución:

Si $f_{\text{máx}}$ es la frecuencia máxima y n_b el número de bits por muestra, entonces, la tasa de bit:

$$N = 2 f_{\text{máx}} n_b = 2 \cdot 4000\,\text{muestras/s} \cdot 8\,\text{bit/muestra} = 64\,\text{kbps}$$

Ref: 2-H-17 ☺☺☺ Problema: 2.74

Responda las siguientes cuestiones respecto la modulación PCM:

a) ¿En qué consiste la cuantificación?

b) Si se quiere transmitir una señal con un ancho de banda de 1 MHz y se utilizan 128 niveles diferentes en la cuantificación, ¿cómo calcularía la capacidad del canal que sería necesaria? Justifique su respuesta.

Resolución:

a) Es el proceso, dentro de la modulación PCM, en el que se decide el número discreto de valores de tensión que va a ser considerado para representar los valores de las muestras analógicas tomadas. En función del número de valores que se consideren, se utilizarán más o menos bits para representar dichos valores, de modo que utilizando n bits por cada muestra analógica (resultante del muestreo PAM) se pueden representar 2^n valores de tensión diferentes. Al cuantificar, hay que hacer corresponder un valor analógico con uno de los 2^n valores posibles, produciendo el consiguiente error de cuantificación, menor cuanto mayor sea el número de niveles de cuantificación considerado y, por tanto, mayor sea el número de bits por muestra.

b) No se puede calcular porque no se conoce la frecuencia máxima de la señal. Suponiendo que es $f_{\text{máx}}$:

$$N = 2f_{\text{máx}} \log_2 128 \,\text{bps}$$

Si queremos reconstruir una señal analógica a partir de muestras digitales, tenenemos que tomar esas muestras cumpliendo el teorema del muestreo, es decir, debemos muestrear la señal analógica, como mínimo, al doble de su frecuencia máxima.

Por tanto, si suponemos que la frecuencia máxima de la señal es $f_{\text{máx}}$, habría que muestrear la señal analógica a $2f_{\text{máx}}$ (como mínimo), es decir, tomaríamos $2f_{\text{máx}}$ muestras por segundo de la señal. Si se usan 128 niveles distintos de cuantificación, necesitamos $\log_2 128$ bits para cada muestra, es decir, 7 bits por muestra. Si tenemos que tomar $2f_{\text{máx}}$ muestras por segundo y por cada muestra necesitamos 7 bits, entonces, se necesitaría una tasa de bits de:

$$N = 2f_{\text{máx}}7 = 14f_{\text{máx}} \,[\text{bps}]$$

Ref: 2-H-18 ☺☺☺ ? R Problema: 2.75

A partir del Teorema de Nyquist, calcule la tasa de muestreo para las siguientes señales analógicas:

a) Una señal con ancho de banda de 2000 Hz.
b) Una señal con frecuencias de 2000 a 6000 Hz.
c) Una señal con una línea horizontal en la representación de dominio del tiempo.
d) Una señal con una línea vertical en la representación de dominio de la frecuencia.

Resolución:

a) Imposible, necesito conocer la frecuencia máxima de la señal dentro de ese ancho de banda, para poder calcular la frecuencia de muestreo.

b) La máxima frecuencia de esta señal es 6000 Hz, luego la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo, del doble, es decir, 12000 Hz.

c) Se trata de una señal continua en el tiempo, luego su frecuencia de muestreo puede ser cualquiera, ya que siempre podremos reconstruirla en el destino aunque tengamos una sola muestra.

d) Se trata de una señal que tiene una única frecuencia, por tanto, habría que muestrear con una frecuencia del doble de dicha frecuencia (valor del eje horizontal de la representación espectral).

Ref: 2-H-19 Problema: 2.76

¿Cuál es la tasa de muestreo requerida para la digitalización de cada una de las señales analógicas siguientes?

a) Señal de voz con ancho de banda $B = 3{,}4\,\text{kHz}$.

b) Una señal de música con ancho de banda $B = 18\,\text{kHz}$.

Resolución:

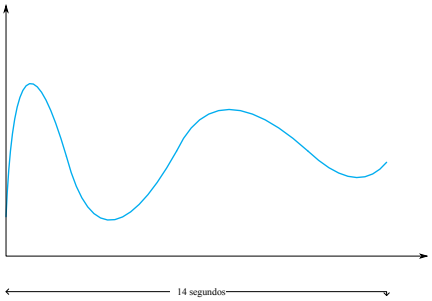
El teorema del muestreo nos dice que la señal debe de ser muestreada al doble (mínimo) de su frecuencia mayor. Por lo tanto:

a) $f_s > 6800\,\text{Hz} = 6800\,\text{muestras/s}$

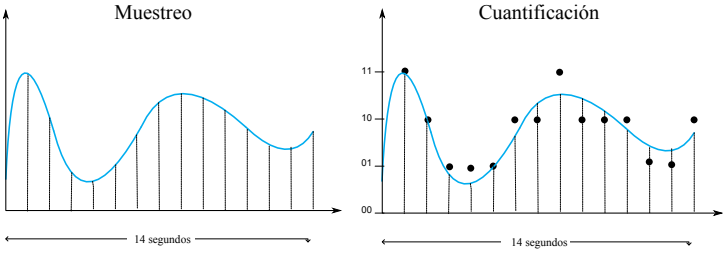
b) $f_s > 36\,\text{kHz} = 36000\,\text{muestras/s}$

Ref: 2-H-21 ☺☺ ? R Problema: 2.77

Sea la señal de voz de la figura. Se quiere muestrear esta señal a una tasa de 1 muestra/seg pues se ha comprobado que esa tasa cumple con el teorema de muestreo. Además, se quiere cuantificar esta señal con dos bits (cuatro niveles). Represente la señal muestreada y cuantificada.



Resolución:

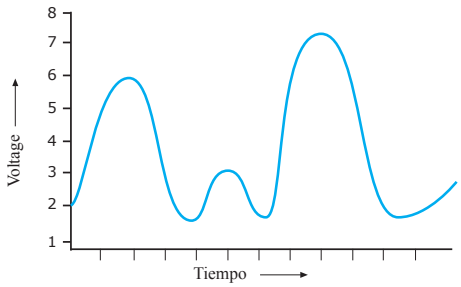


La señal digital codificada corresponde a:

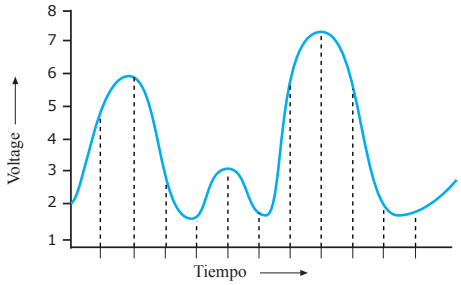
1110 0101 0110 1011 1010 1001 0110

Ref: 2-H-22 ☺ ? R Problema: 2.78

Dada la señal analógica de la figura, ¿cuál será la secuencia de pulsos de 8 bits codificados mediante PCM?



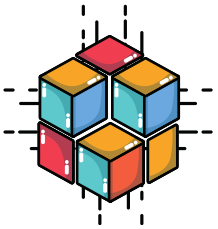
Resolución:



Aproximadamente:

$$4{,}4 \rightarrow 5{,}9 \rightarrow 2{,}8 \rightarrow 1{,}5 \rightarrow 3{,}0 \rightarrow 1{,}6 \rightarrow 5{,}8 \rightarrow 7{,}2 \rightarrow 5{,}1 \rightarrow 1{,}7 \rightarrow 1{,}6$$

Ref: 2-H-27 ☺☺☺ | Problema: 2.79



Supongamos una señal muestreada paso-bajo con un ancho de banda de 200 kHz utilizando 1024 niveles de cuantificación. Calcula:

a) Frecuencia de Nyquist.
b) Tasa de bits de la señal digitalizada.
c) SNR_{dB} de la señal.
d) Ancho de banda PCM para esta señal.

Resolución:

a) En una señal paso-bajo, la frecuencia inicial es 0. Por lo tanto, la frecuencia máxima:

$$f_{\text{máx}} = 0 + 200 = 200\,\text{kHz}$$

Entonces, la frecuencia de Nyquist:

$$f_s = 2f_{\text{máx}} = 2 \cdot 200\,\text{kHz} = 400\,\text{kHz}$$

b) Si L es el número de niveles de la señal, entonces, el número de bits por muestra:

$$n_b = \log_2 L = \log_2 1024 = 10\,\text{bits/muestra}$$

y, por lo tanto, la tasa de bits:

$$N = f_s n_b = 400K\,\text{muestras/s} \cdot 10\,\text{bits/muestra} = 4\,\text{Mbps}$$

c) El valor de $n_b = 10$, por tanto:

$$SNR_{dB} = 6{,}02 n_b + 1{,}76 = 61{,}96\,\text{dB}$$

d) A partir de $n_b = 10$, el ancho de banda mínimo:

$$B_{PCM} = n_b B_{analog} = 10 \cdot 200\,\text{kHz} = 2\,\text{MHz}$$

Ref: 2-H-33	☺☺	?	R		Problema: 2.80

¿Cuál es la tasa de muestreo de Nyquist para una señal con ancho de banda de 200 kHz, en los siguientes casos?

a) Paso-bajo.

b) Paso-banda.

c) Paso-banda si la frecuencia más baja es 100 kHz.

Resolución:

a) En una señal paso bajo, la frecuencia mínima es 0, por lo tanto, tenemos que:

$$f_{\text{máx}} = 0 + 200 = 200\,\text{kHz} \rightarrow f_s = 2 \cdot 200\,\text{kHz} = 400\,\text{kHz}$$

b) No se puede encontrar la tasa de muestreo para este caso, debido a que no se conoce donde comienza o finaliza el ancho de banda. No se conoce la frecuencia de la señal.

c) En una señal paso-banda, la frecuencia máxima es igual a la frecuencia mínima más el ancho de banda, por lo tanto, tenemos que:

$$f_{\text{máx}} = 1000 + 200 = 300\,\text{KHz} \rightarrow f_s = 2 \cdot 300\,\text{kHz} = 600\,\text{kHz}$$

Ref: 2-H-40 ☺☺☺ Problema: 2.81

Sea una onda sinusoidal simple de frecuencia f. Explica el efecto del muestreo a las siguientes frecuencias:

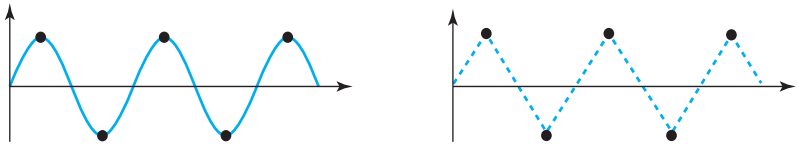
a) $2f$

b) $4f$

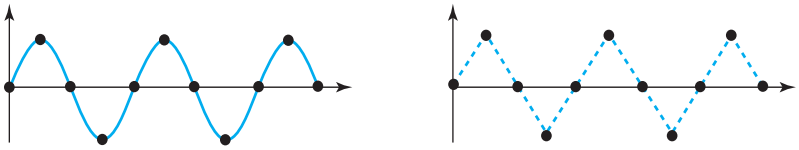
c) f

Resolución:

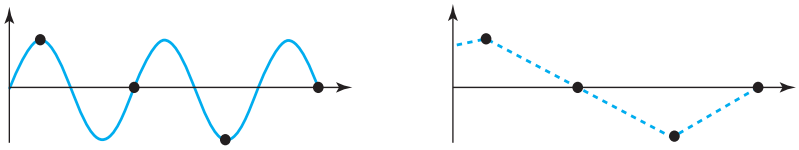
En la siguiente figura se muestra el muestreo de la señal, en relación a la frecuencia $2f$, denominada, *frecuencia de Nyquist*:



(a) Muestreo a tasa de Nyquist $f_s=2f$



(b) Sobremuestreo: $f_s=4f$



[*Forouzan*]

(c) Inframuestreo: $f_s=f$

a) El muestreo a la frecuencia $2f$, obtiene una buena aproximación de la señal original.

b) Un muestreo a la frecuencia $4f$, el doble de la frecuencia de *frecuencia de Nyquist*, también obtiene una buena aproximación, pero es redundante e innecesaria.

c) Sin embargo, un muestreo a la frecuencia f, menor de la *frecuencia de Nyquist*, no obtiene una aproximación de la señal original.

Ref: 2-H-41 ☺☺☺ ? R Problema: 2.82

Supongamos un reloj de agujas donde la aguja de los minutos tiene un periodo de 60 s. Explica qué ocurre si muestreamos, por ejemplo, tomamos una foto y la enviamos, de forma periódica, el movimiento de la aguja de los minutos, a las siguientes frecuencias:

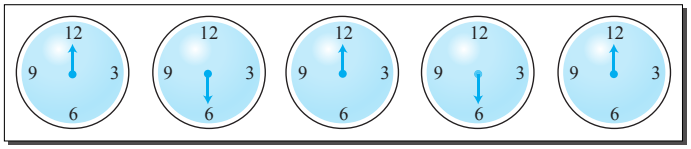
a) $2f$

b) $4f$

c) f

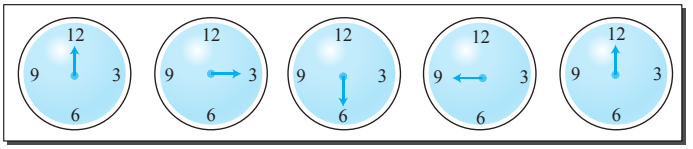
Resolución:

Según el Teorema de Nyquist, necesitamos muestrear (tomar la foto y enviar) la aguja cada 30 segundos, de forma que $T_s = \frac{1}{2}T$ ó $f_s = 2f$, por lo tanto:



Las muestras pueden indicar que el reloj se está moviendo hacia delante o hacia atrás (12-6-12-6-12)

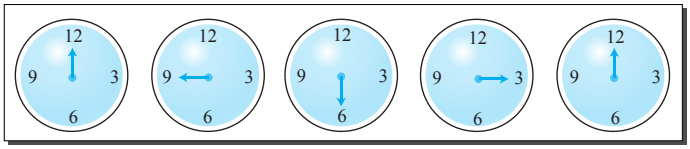
(a) Muestreo a tasa de Nyquist: $T_s = T\frac{1}{2}$



Las muestras indican que se está moviendo hacia delante. (12-3-6-9-12)

(b) Sobremuestreo (superior a tasa de Nyquist): $T_s = T\frac{1}{4}$

[Foruzan]



Las muestras indican que se está moviendo hacia atrás. (12-9-6-3-12)

(c) Inframuestreo (inferior a tasa de Nyquist): $T_s = T\frac{3}{4}$

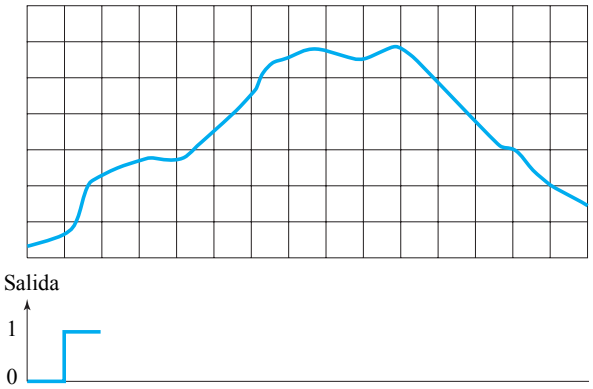
a) Los puntos de muestreo, en orden, son 12, 6, 12, 6, 12 y 6. El receptor de las imágenes (muestras) no puede determinar si el reloj se está moviendo hacia adelante o hacia atrás.

b) Los puntos de muestreo, en orden, son 12, 3, 6, 9 y 12. El receptor de las imágenes determina, claramente, que el reloj se está moviendo hacia adelante.

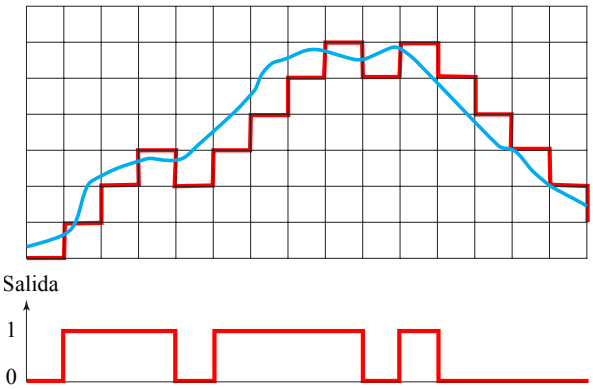
c) En este caso, la frecuencia de muestreo es menor que la frecuencia de Nyquist, concretamente, $T_s = \frac{3}{4}T$ ó $f_s = \frac{4}{3}f$. Los puntos de muestreo, en orden, son 12, 9, 6, 3 y 12. Aunque el reloj se está moviendo hacia adelante, el receptor piensa que el reloj se está moviendo hacia atrás.

Ref: 2-H-80 | Problema: 2.83

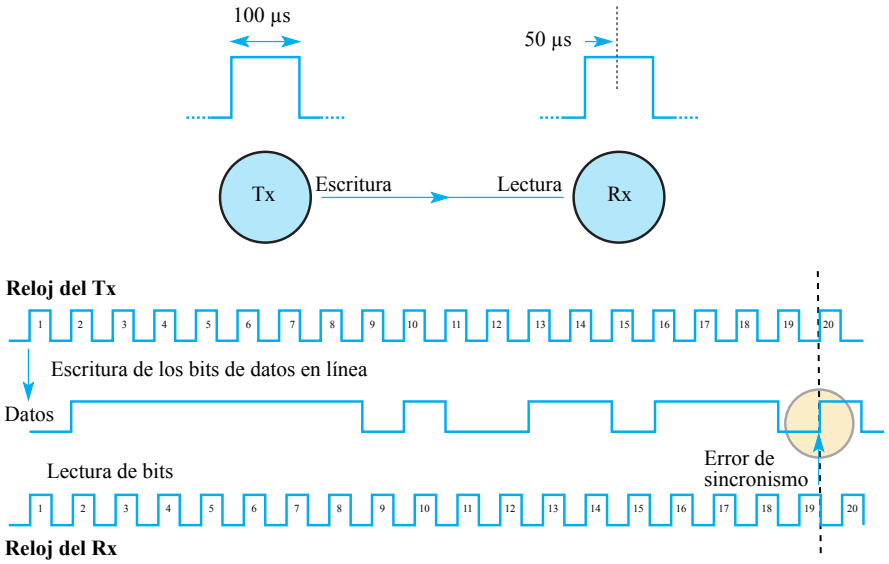
Queremos convertir la señal analógica de la figura en modulación Delta. El periodo de muestreo y el paso del cuanto están indicados en la figura. Se muestran el primer bit del modulador y la función escalera del primer periodo. Representar el resto de la función escalera y la salida del modulador. Indicar las regiones donde existe distorsión por sobrecarga de pendiente.



Resolución:

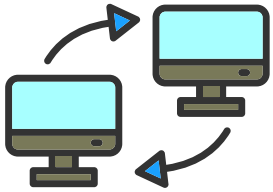


I



- Transmisión serie síncrona/asíncrona
- Bits de START/STOP
- Rendimiento
- Sincronización de temporización emisor/receptor

Ref: 2-I-01 | Problema: 2.84



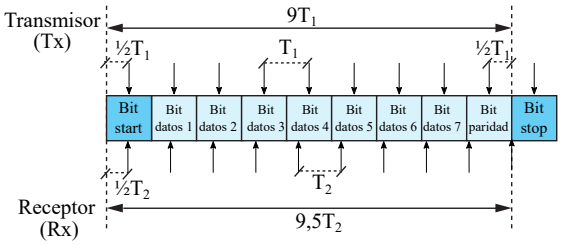
Supongamos dos dispositivos conectados por un canal serie asíncrono cuyo esquema de transmisión está formado por 1 bit de *START*, 7 bits de datos, 1 bit de paridad y 1 bit de *STOP*. ¿Cuál es el margen de desincronización máxima permitida entre ambos dispositivos para que no se produzca error de sincronismo suponiendo V_t = 350 bps? Suponemos que se produce la sincronización en el bit *START*.

Resolución:

Sean T_1 y T_2 el intervalo de bit en el emisor y receptor, respectivamente. El tamaño de la trama es de 10 bits (1 bit *START* + 7 bits de datos + 1 bit de paridad + 1 bit *STOP*).

Evidentemente, los relojes de ambos dispositivos pueden tener una cierta desincronización, si suponemos que en el primer bit transmitido, ambos relojes están sincronizados, hay que asegurar que el último bit se muestrea dentro del intervalo de bit correspondiente, incluso, con esa cierta desviación de sincronización. Además, suponemos que el bit de comienzo se muestrea justo en la mitad del tiempo de bit. Por lo tanto, se pueden producir las siguientes situaciones:

- $T_1 > T_2$: El reloj del receptor (Rx) adelanta (*más rápido*) con respecto al transmisor (Tx).

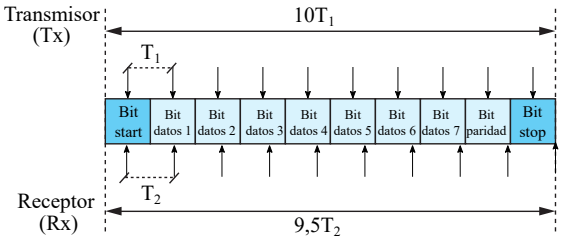


luego, la proporción entre ambos temporizadores:

$$9{,}5T_2 > 9T_1 \rightarrow \frac{T_1}{T_2} < \frac{9{,}5}{9} \approx 1{,}06$$

En definitiva, el reloj del Rx puede ser, como máximo, 6 % más rápido que el Tx.

- $T_1 < T_2$: El reloj del Rx atrasa (*más lento*) con respecto al Tx.



luego, la proporción entre ambos temporizadores:

$$9{,}5T_2 < 10T_1 \rightarrow \frac{T_2}{T_1} < \frac{10}{9{,}5} \approx 1{,}0526$$

Por lo tanto, el reloj del Rx puede ser, como máximo, 5,26 % más lento que el Tx, para que no se produzca error de lectura debido a sincronización.

Para asegurarnos una lectura correcta en ambas situaciones, hay que escoger el caso más restrictivo (peor caso), es decir, el valor mínimo, por tanto, una variación del 5,26 %.

Si la velocidad de transmisión V_t = 350 bps, entonces para que no se produzca error de lectura, la variación permitida será como máximo de ±5,26 %, que supone una variación de ±18,41 bps. En consecuencia, la $V_t = 350 \pm 18{,}41$ bps, es decir, la velocidad de transmisión, tanto de receptor como de emisor han de estar en el rango $\approx [331{,}6;\ 368{,}4]$ bps.

Nota: debe tenerse en cuenta que los valores obtenidos son un límite bastante optimista, ya que se están haciendo las siguientes consideraciones:

- El bit de comienzo se muestrea justo a la mitad del intervalo de bit.
- Es aceptable muestrear el último bit tan cerca como se quiera del comienzo o del final del bit.

Considerar que la comunicación Tx-Rx es asíncrona, y por tanto, no existe ningún circuito ni elemento sincronizador entre ambos dispositivos, por lo que necesitan autosincronizarse a través de la trama recibida. Evidentemente, ambos relojes no van a estar perfectamente sincronizados, por tanto, uno será más rápido que el otro. El problema plantea la cuestión de *¿qué margen de desviación en la sincronización se permite para una determinada estructura de trama y velocidad?* Se plantean las siguientes opciones:

- *Rx más rápido:* en este caso, los intervalos de bits se irán desviando produciendo que el tiempo de muestreo se adelante, entonces, la cuestión es: ¿qué margen de desviación se permite para que como mínimo, el último bit muestreado en el Rx corresponda al `Bit Stop`?
- *Rx más lento:* como el receptor va introduciendo un pequeño retraso en cada muestreo, la cuestión es determinar la desviación permitida para que el último bit muestreado por el Rx se produzca a lo largo del intervalo de bit correspondiente al `Bit Stop`.

Ref: 2-I-03 | ☺☺ | ? | R | | Problema: 2.85

En una transmisión digital, el reloj del receptor es 10 % más rápido que el reloj del emisor. ¿Cuántos bits extra por segundo recibirá el receptor en caso de las siguientes tasas de transmisión?

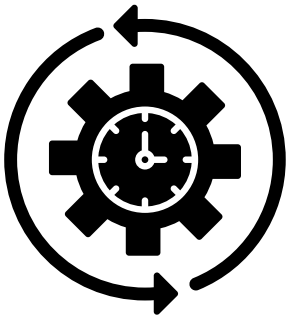
a) 1 kbps.
b) 1 Mbps.

Resolución:

a) A 1 kbps, el receptor recibe 1100 bps, en lugar de 1000 bps, por lo tanto, 100 bps extra.

b) A 1 Mbps, el receptor recibe 1100000 bps, en lugar de 1000000 bps, por lo tanto, 100000 bps extra.

Ref: 2-I-07 Problema: 2.86



Supongamos se quieren transmitir 1000 caracteres codificando cada carácter como 8 bits. Encuentra el total de bits transmitidos y el porcentaje de redundancia en los siguientes casos de transmisión digital serie:

a) Síncrona

b) Asíncrona, suponiendo 1 bit de *start* y 1 bit de *stop*.

Resolución:

a) En transmisión digital serie síncrona, no se añade ningún bit adicional, por tanto, el total de bits transmitidos:

$$n = 1000 \cdot 8 = 8000\,\text{bits}$$

y, evidentemente, supone una redundancia del 0 %.

b) En transmisión digital serie asíncrona, es necesario añadir bits de *start* y *stop*, por tanto, el total de bits transmitidos:

$$n = 1000 \cdot 10 = 10000\,\text{bits}$$

por lo tanto, 10000/8000 = 1,25, lo que supone una redundacia del 25 %.

Ref: 2-I-08 | Problema: 2.87

Se desea diseñar un sistema de comunicaciones basado en transmisión asíncrona, con tramas formadas por 16 bits de delimitadores (flags) de trama y 32 bits de control. Para conseguir una eficiencia superior al 80 %, ¿cuál debe ser la longitud de trama?

Resolución:

La trama contiene bits de datos, control y delimitadores (flags), con una longitud total:

$$L = datos + control + flags = datos + 32 + 16 = datos + 48 \tag{2.4}$$

Sea η la eficiencia, expresada como la proporción entre longitud de datos y longitud total de trama:

$$\eta = \frac{datos}{L} \geq 0{,}8$$

por lo tanto:

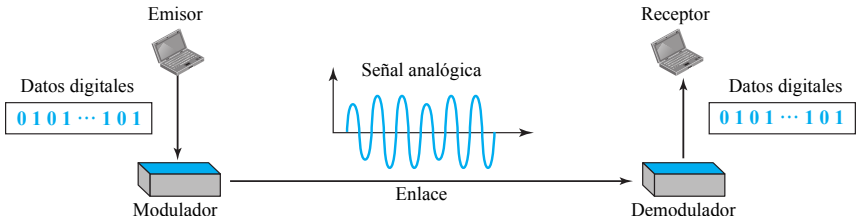
$$datos \geq 0{,}8L \tag{2.5}$$

A partir de (2.4) y (2.5) se obtiene la longitud de la trama que consigue la eficiencia especificada:

$$L \geq 0{,}8L + 48$$
$$L \geq 240$$

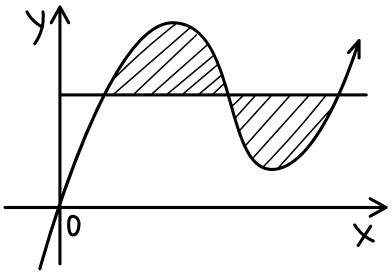
Nota: observa que el enunciado dice que hay 16 bits de delimitadores en total, pero no dice si están al principio o al final de la trama o repartidos entre ambos sitios. En cualquier caso, para la resolución del problema es indiferente.

J



- Conversión digital-analógico
- Tasa de baudios
- ASK, PSK, FSK, QPSK
- QAM
- Modems, 56K, ADSL

Ref: 2-J-01 | ☺☺☺ | Problema: 2.88



Una señal analógica transporta 4 bits por elemento señal. Si se envían 1000 elementos señal por segundo, ¿cuál es la tasa de bits?

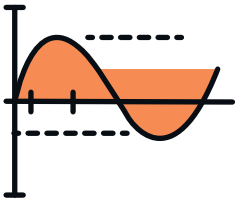
Resolución:

En este caso, $r = 4$ y $S = 1000$, y debemos calcular N, entonces:

$$S = N\frac{1}{r}$$

$$N = Sr = 1000 \cdot 4 = 4\,\text{kbps}$$

Ref: 2-J-02 | Problema: 2.89



Sea una señal analógica con una tasa de bits de 8000 bps y tasa de símbolos de 1000 baudios. Calcula:

a) Elementos dato transportados en cada elemento señal.

b) Nº de elementos señal necesarios.

Resolución:

a) Si S es la tasa de símbolos, N la tasa de bits y r el número de elementos dato transportado por cada elemento señal, entonces:

$$S = N\frac{1}{r}$$

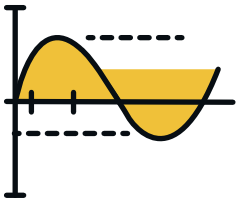
luego:

$$r = \frac{N}{S} = \frac{8000}{1000} = 8\,\text{bits/baud}$$

b) Si L es el número de niveles de la señal, entonces, a partir de $r = 8$, son necesarios:

$$r = \log_2 L$$
$$L = 2^r = 2^8 = 256\,\text{niveles}$$

Ref: 2-J-03 ☺☺ Problema: 2.90



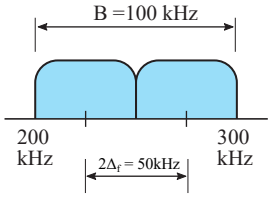
Sea un ancho de banda de 100 kHz distribuido en una franja de 200-300 kHz. Suponemos factor de filtrado $d = 1$. Calcular, para ASK y FSK:

a) Bandas de frencuencia.
b) ¿Cuál es la frecuencia central?
c) Tasa de bits conseguida.

Resolución:

En el caso de ASK:

a) Las bandas de frecuencia:



b) La frecuencia central del ancho banda está localizada en $f_c = 250\,\text{kHz}$.

c) Si B es el ancho de banda, S la tasa de símbolos, N la tasa de bits, con $d = 1$ y $r = 1$, entonces:

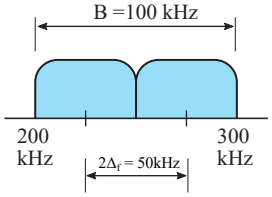
$$B = (1 + d)S$$
$$N = Sr$$

entonces:

$$N = \frac{B}{1+d} r = \frac{100}{2} = 50\,\text{kbps}$$

En el caso de FSK:

a) Las bandas de frecuencia:



b) La frecuencia central del ancho de banda está localizada en $f_c = 250\,\text{kHz}$.

c) Si $2\Delta_f = 50\,\text{kHz}$, S es la tasa de símbolos, B es el ancho de banda, N la tasa de bits con $d = 1$ y $r = 1$, entonces:

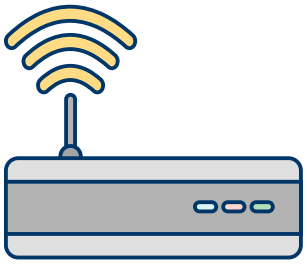
$$B = (1 + d)S + 2\Delta_f = 100$$
$$2S = 100 - 50\,\text{kHz}$$
$$S = 25\,\text{kbaud}$$

Por lo tanto:

$$N = Sr = 25\,\text{kbps}$$

Nota: Comparando ambos esquemas, observamos que la tasa de bits para ASK es 50 kbps, mientras que para FSK es 25 kbps.

Ref: 2-J-05 ☺☺☺ Problema: 2.91



Calcula la velocidad de transmisión de un sistema que transmite a 1000 baudios, según los siguientes esquemas de modulación:

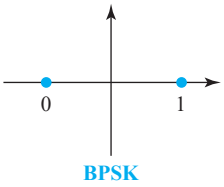
a) PSK
b) QPSK

Resolución:

Si r es el número de bits por elemento de señal, entonces, S es la tasa en baudios y N la tasa en bits, entonces:

$$N = rS$$

a) En PSK tenemos el siguiente diagrama de constelación:

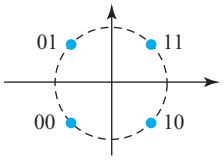


BPSK

por lo que, cada elemento de señal puede tomar dos valores distintos, por lo tanto, en cada elemento de señal se transmite 1 bit, porque $\log_2 2 = 1$, por lo tanto, $r = 1$, entonces:

$$N = rS = 1 \cdot 1000 = 1000\,\text{bps}$$

b) En QPSK tenemos el siguiente diagrama de constelación:

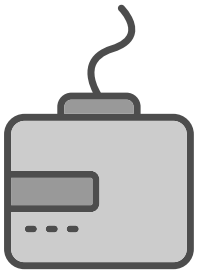


QPSK

entonces, cada valor de señal puede tomar hasta cuatro valores distintos, por lo tanto, cada elemento de señal transporta 2 bits, ya que $\log_2 4 = 2$, por lo tanto, $r = 2$, entonces:

$$N = rS = 2 \cdot 1000 = 2000\,\text{bps}$$

Ref: 2-J-08 | Problema: 2.92



Calcula la tasa de baudios para las siguientes tasas de bits y tipos de modulación:

a) 2000 bps, FSK
b) 4000 bps, ASK
c) 6000 bps, QPSK
d) 36000 bps, 64-QAM

Resolución:

Para el cálculo de la tasa de señal utilizamos la expresión:

$$S = \frac{1}{r} N$$

pero antes es necesario calcular el valor de r en cada caso:

a) $L = 2 \rightarrow r = \log_2 2 = 1 \rightarrow S = 1/1 \cdot 2000\,\text{bps} = 2000\,\text{baud}$

b) $L = 2 \rightarrow r = \log_2 2 = 1 \rightarrow S = 1/1 \cdot 4000\,\text{bps} = 4000\,\text{baud}$

c) $L = 4 \rightarrow r = \log_2 4 = 2 \rightarrow S = 1/2 \cdot 6000\,\text{bps} = 3000\,\text{baud}$

d) $L = 64 \rightarrow r = \log_2 64 = 6 \rightarrow S = 1/6 \cdot 36000\,\text{bps} = 6000\,\text{baud}$

Ref: 2-J-11 | ☺☺☺ | | | | Problema: 2.93

Representa el diagrama de constelación en los siguientes casos:

a) ASK, con picos de amplitud de 1 y 3.

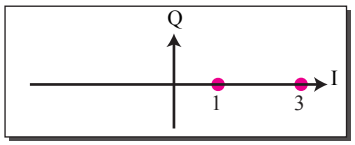
b) BPSK, con un pico de amplitud de 2.

c) QPSK, con un pico de amplitud de 3.

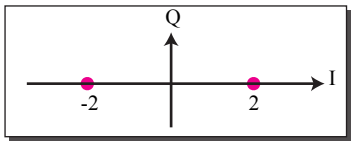
d) 8-QAM, con dos picos de amplitud diferentes de 1 y 3, y cuatro fases diferentes.

Resolución:

a) Tenemos dos elementos de señal con picos de amplitud de 1 y 3. La fase de ambos elementos es la misma y suponemos 0 grados.

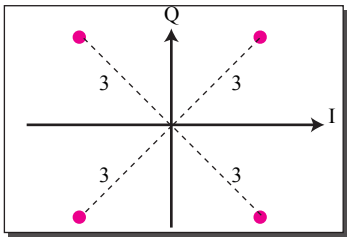


b) Tenemos dos elementos de señal con picos de amplitud de 2. Por lo tanto, deben haber 180 grados de diferencia entre ambas fases. Suponemos una fase en 0 y la otra en 180 grados.

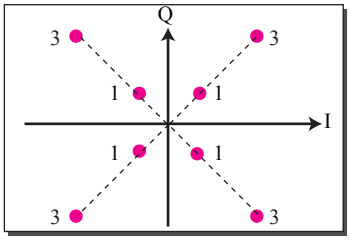


c) Tenemos cuatro elementos de señal con el mismo pico de amplitud de 3. Por lo tanto, deben haber 90 grados de diferencia entre cada fase. Suponemos que la primera fase está en 45, y por lo tanto, la segunda en 135, la tercera en 225 y la cuarta en 315 grados.

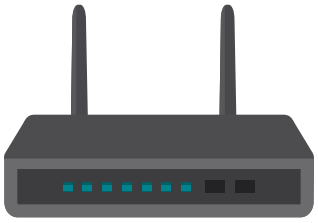
Nota: hay múltiples soluciones alternativas, por ejemplo, 0, 90, 180 y 270 grados.



d) Tenemos cuatro fases, seleccionadas igual que en *(c)*. Para cada fase, además tenemos dos amplitudes, 1 y 3.



Ref: 2-J-14 | Problema: 2.94



¿Cuál es el ancho de banda necesario para los siguientes casos si necesitamos 4000 bps? Suponemos $d = 1$.

a) ASK
b) FSK con $2\Delta_f = 4\,\text{kHz}$
c) 2-QPSK
d) 16-QAM

Resolución:

A partir de la expresión:

$$B = (1+d)\frac{1}{r}N$$

y considerando $d = 1$:

$$B = 2\frac{1}{r}N$$

Para cada modulación, tenemos diferentes valores de r, por lo tanto:

a) $r = 1 \rightarrow B = 2 \cdot \frac{1}{1} \cdot 4000\,\text{bps} = 8000\,\text{Hz}$

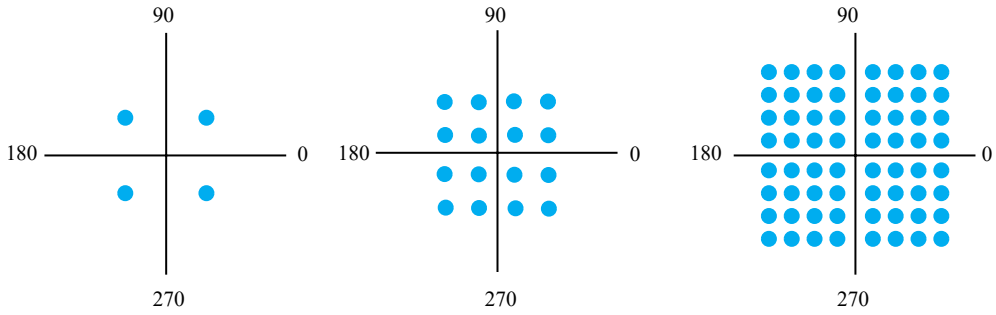
b) $r = 1 \rightarrow B = 2 \cdot \frac{1}{1} \cdot 8000\,\text{bps} + 4\,\text{kHz} = 12000\,\text{Hz}$

c) $r = 2 \rightarrow B = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4000\,\text{bps} = 2000\,\text{Hz}$

d) $r = 4 \rightarrow B = 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot 4000\,\text{bps} = 1000\,\text{Hz}$

Ref: 2-J-18 ☺☺☺ Problema: 2.95

Se representan diferentes diagramas de constelación utilizados en transmisión de datos vía modem. Suponiendo una tasa de señal de 1200 baudios, ¿qué tasa de datos (bps) puede conseguir un modem en cada uno de los esquemas propuestos?



(a) QPSK (b) 16-QAM (c) 64-QAM

Sol: *a*) - *b*) 4800 bps *c*) -

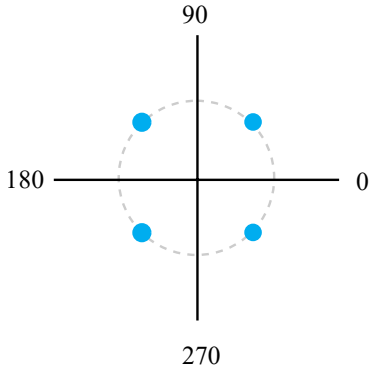
Ref: 2-J-20 | ☺☺☺ | ? | R | Problema: 2.96

En un diagrama de constelación en el que todos los puntos están en un círculo centrado en el origen. ¿Qué tipo de modulación utiliza?

Resolución:

El diagrama de constelación tendría una representación como la figura, donde podemos observar las siguientes consideraciones:

- Al estar todos los puntos equidistantes del origen, todos ellos tienen la misma amplitud, por lo tanto, no utiliza modulación por desplazamiento de amplitud.
- La modulación por desplazamiento de frecuencia nunca utiliza diagramas de constelación.



Por lo tanto, podemos concluir que utiliza modulación por desplazamiento de fase.

Ref: 2-J-22 | Problema: 2.97

Sea un canal ASK, full-dúplex con ancho de banda repartido en la banda 200-300 kHz. Suponemos $d = 1$.

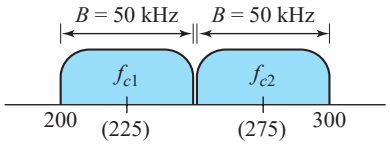
a) Represente la distribución de frecuencias.

b) ¿Qué ancho de banda tendrá el canal en cada sentido?

c) ¿Qué tasa de datos tendrá cada canal?

Resolución:

a) La distribución de frecuencias:



b) Cada uno de los canales tendrá la mitad del total del ancho de banda, por tanto, $B = 50\,\text{kHz}$.

c) En ASK, se cumple que:

$$B = (1 + d)S$$
$$S = N$$

por lo tanto, la tasa de datos para cada canal es $N = 25\,\text{kbps}$.

Ref: 2-J-26 | ☺☺☺ | Problema: 2.98

¿Por qué se necesita un módem para transmitir datos digitales por la red telefónica conmutada? Describir mediante un gráfico temporal los siguientes métodos de modulación para la transmisión de la secuencia digital "*1011001*":

a) ASK

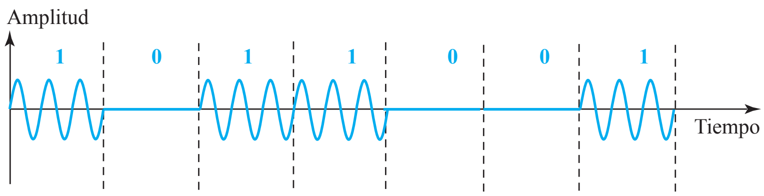
b) FSK

c) PSK

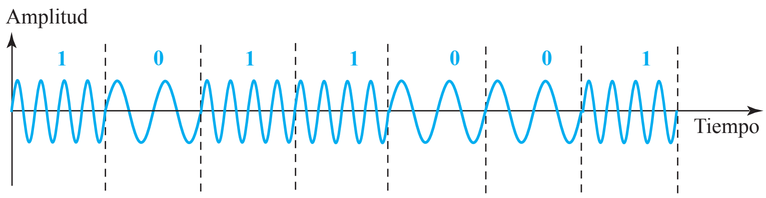
Resolución:

Las señales que viajan por la RTC (*Red telefónica conmutada*) son analógicas, luego hay que transformar los datos digitales para que puedan ser transportados por señales analógicas. Además, hay que adaptar el espectro de la señal a transmitir a un espectro compatible con el del ancho de banda del canal telefónico.

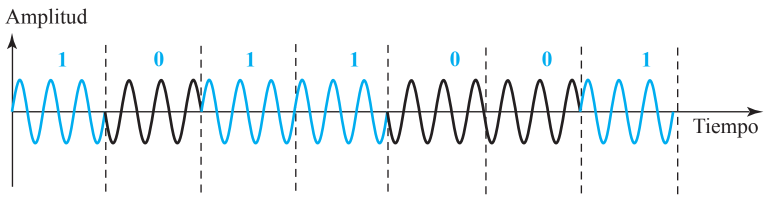
a) En ASK se utilizan amplitudes diferentes para el 0 y 1.



b) En FSK se utilizan frecuencias diferentes para el 0 y 1.



c) En PSK se utilizan fases diferentes para el 0 y 1.



En los tres casos se envía 1 bit por cada elemento de señal, símbolo o baudio.

Ref: 2-J-29 Problema: 2.99

¿Por qué es necesaria la modulación de señales?

Resolución:

Es necesaria en el caso de que el ancho de banda de la señal a transmitir no coincide con el ancho de banda del canal o porque se quieren transmitir datos digitales mediante señales analógicas.

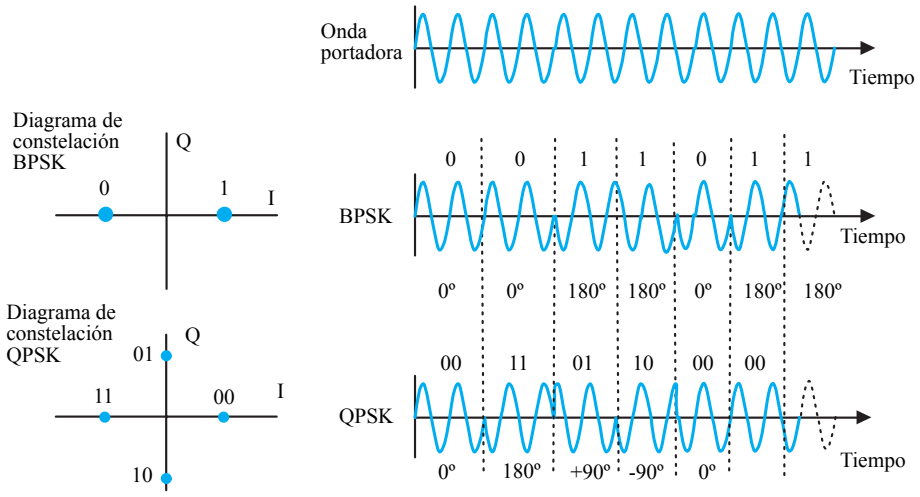
Ref: 2-J-39 ☺☺ ? R Problema: 2.100

Representa las siguientes modulaciones analógicas:

a) Modulación BPSK de la secuencia binaria 001 1011

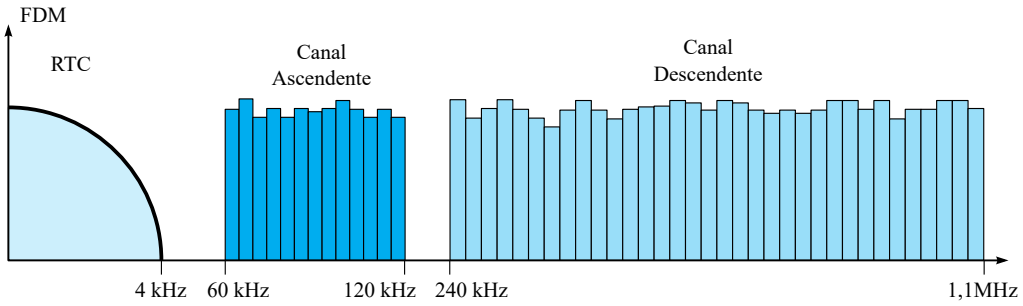
b) Modulación QPSK de la secuencia binaria 0011 0110 0000

Resolución:



Ref: 2-J-48 | ☺☺☺☺ | ? | R | Problema: 2.101

Sea un sistema ADSL que utiliza DMT. De los 256 canales disponibles utiliza 6 para el servicio POTS (*Plain Old Telephone Service*) y 2 canales para control. Del restante de canales de datos, utiliza 3/4 para el canal descendente. Suponemos que opera sobre una línea analógica con una tasa de señal de 4000 baudios y modulación 64-QAM. Calcula la tasa de datos de los canales descendente y ascendente.



Resolución:

A partir de los 256 canales, como destinamos 6 canales para POTS y 2 canales de control, nos quedan 248 canales disponibles para datos. Si 3/4 de ellos es el canal descendente, supone que dispone de 186 canales. Si la línea tiene una tasa de señal de $S = 4000\,\text{baud}$ en modulación 64-QAM, implica que codifica 64 niveles de señal, y por lo tanto, $r = 6$. En consecuencia, la tasa de datos de cada canal:

$$N_i = rS = 6 \cdot 4000 = 24000\,\text{bps}$$

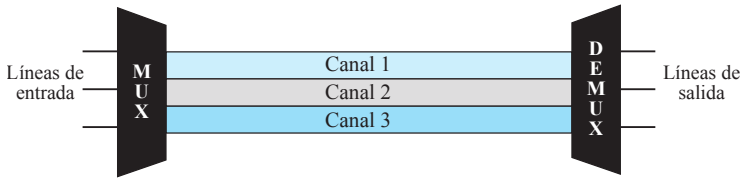
Por lo tanto, la tasa de datos *descendente* total:

$$N_{\downarrow} = 186 \cdot 24000 = 4{,}464\,\text{Mbps}$$

De forma análoga, el canal *ascendente* dispone de 62 canales, a 24000 bps cada uno, por lo tanto, la tasa de datos ascendente total:

$$N_{\uparrow} = 62 \cdot 24000 = 1{,}488\,\text{Mbps}$$

N



- Multiplexación por división de frecuencias (FDM)
- Bandas de guarda
- Jerarquía analógica

Ref: 2-N-01 ☺☺☺ ? R Problema: 2.102

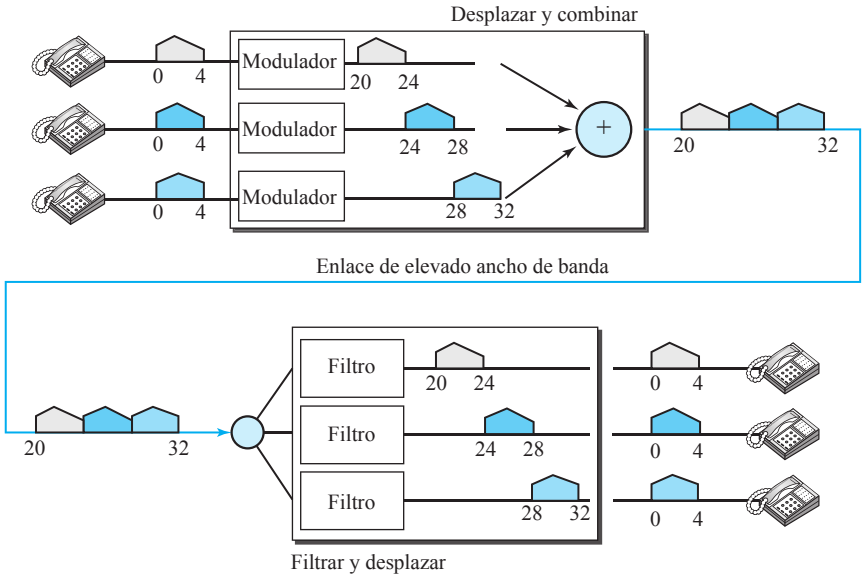
Supongamos un canal de voz ocupa un ancho de banda de 4 kHz. Necesitamos combinar tres canales de voz en un enlace con un ancho de banda de 12 kHz, repartido entre las bandas 20 y 32 kHz. Mostrar la configuración utilizando dominio frecuencial y sin bandas de guarda.

Resolución:

Cada uno de los canales de voz se desplazan (modulan) a un ancho de banda diferente, con la siguiente disposición:

- Utilizamos la banda de 20-24 kHz para el primer canal.
- 24-28 kHz para el segundo canal.
- 28-32 kHz para el tercer canal.

En el receptor, mediante el uso de filtros, se obtienen las bandas de frecuencia originales. En la figura adjunta, se representa el esquema tanto del multiplexor como demultiplexor.



Ref: 2-N-02 Problema: 2.103

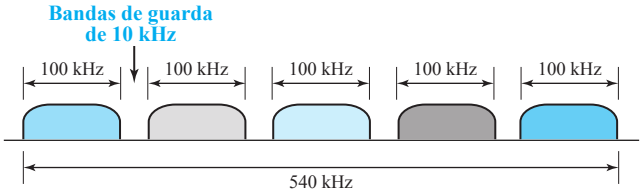
Cinco canales, de 100 kHz de ancho de banda cada uno, tienen que ser multiplexados. ¿Cuál es el ancho de banda mínimo del enlace multiplexado si es necesario dejar bandas de guarda de 10 kHz entre los canales para prevenir interferencias?

Resolución:

Para cinco canales, necesitamos, al menos, cuatro bandas de guarda. Por lo tanto, el ancho de banda requerido es, al menos:

$$B = 5 \cdot 100 + 4 \cdot 10 = 540\,\text{kHz}$$

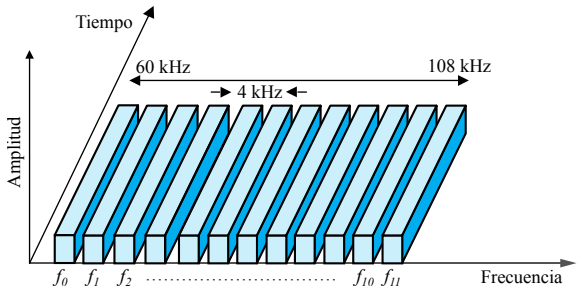
y con la disposición que se indica en la figura:



Ref: 2-N-06 ☺☺☺ ? R Problema: 2.104

En la década de los 60, el primer sistema multiplexado utilizado para telefonía utilizaba FDM. Este sistema multiplexaba 12 abonados, cada uno de ellos con un ancho de banda de 4 kHz, y un ancho de banda de línea multiplexada entre 60-108 kHz. Representa, gráficamente, el espectro de frecuencias.

Resolución:



Ref: 2-N-07 Problema: 2.105

¿Qué son las bandas de guarda en FDM?

Resolución:

Para conseguir una comunicación sin interferencias, es necesario seleccionar un conjunto de frecuencias portadoras con huecos entre ellas, conocidas como, bandas de guarda. El uso de bandas de guarda reduce o elimina las posibles interferencias entre señales portadoras vecinas.

Ref: 2-N-32 | Problema: 2.106

Se pretenden transmitir 30 conversaciones telefónicas simultáneamente por el mismo medio de transmisión.

a) ¿Cómo se puede hacer empleando la técnica de FDM (*Multiplexación por División en Frecuencia*)? ¿Qué ancho de banda se necesita?

b) ¿Cómo se puede hacer empleando la técnica de TDM (*Multiplexación por División en el Tiempo*)? ¿Qué anchura ancho de banda se necesita en este caso?

Resolución:

Una señal telefónica convencional, es decir, la que se obtiene a la salida de un teléfono analógico, es una señal analógica con un espectro de frecuencias comprendido entre 300 – 3400 Hz.

a) La técnica FDM permite combinar varias señales analógicas del mismo ancho de banda para transmitirlas juntas. La primera operación que hay que realizar es trasladar en frecuencias las treinta señales, para que al combinarlas no se mezclen unas con otras.

La modulación permite desplazar una señal analógica en frecuencias. Por tanto, aquí modulamos en amplitud las 30 señales con treinta señales portadoras distintas y suprimimos mediante filtrado una de las dos bandas que produce dicha modulación, por ejemplo, la banda superior.

Podemos emplear, por tanto, 30 portadoras separadas 4 kHz. Tradicionalmente, en el tratamiento de señales telefónicas, se dedican a cada señal 4 kHz en vez de 3,1 kHz, para dejar una banda de separación entre señales. Luego en este caso las portadoras pueden ser las señales de 4 kHz, 8 kHz, ..., 120 kHz (4 kHz × 30).

Por tanto, el ancho de banda necesario será de 120 kHz.

b) La técnica TDM permite combinar varias señales analógicas, basándose en que para transmitir una señal es suficiente transmitir sus muestras tomadas a una velocidad igual o superior al doble de su ancho de banda.

Para transmitir señales telefónicas en forma digital se ha normalizado un método de modulación y codificación denominado PCM (*Modulación por Impulsos Codificados*) y un sistema de multiplexación MIC (30 + 2) que permite multiplexar 30 conversaciones telefónicas.

Dicho sistema emplea 30 canales para llevar señales telefónicas y 2 más para señalización, sincronización, señales de mantenimiento, etc. Se considera para cada señal un ancho de banda de 4 kHz, por tanto se muestrea a una velocidad de $2 \cdot 4000 = 8000$ muestras/seg. Cada muestra se codifica con 8 bits, por tanto, el régimen binario de cada señal es de:

$$8000\,\text{muestras/seg} \cdot 8\,\text{bit/muestra} = 64\,\text{kbps}$$

Por tanto, el régimen binario del sistema MIC (30 + 2) es de:

$$32 \cdot 64\,\text{Kbit/seg} = 2048\,\text{Mbit/seg}$$

En línea, un sistema de transmisión MIC (30 + 2) transmite 2048000 pulsos binarios por seg. El ancho de banda mínimo necesario para transmitir esos pulsos lo podemos obtener de forma aproximada a partir de la expresión:

$$W \geq \frac{1}{2T_{min}}$$

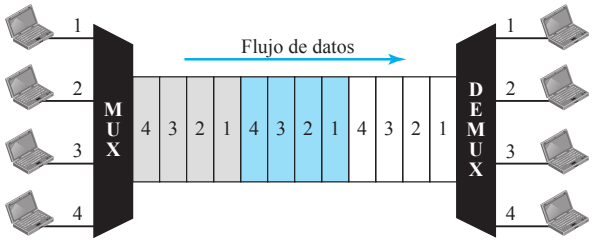
Siendo T_{min} la duración (anchura) del pulso mínimo. En este caso:

$$T_{min} = \frac{1}{2048000}\,\mathrm{s}$$

Luego, el ancho de banda será:

$$W \geq \frac{1}{2 \cdot \frac{1}{2048000}} = 1024\,\mathrm{MHz}$$

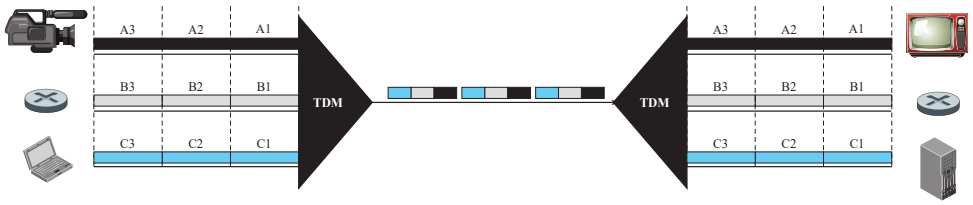
O



- Multiplexación por división de tiempo (TDM)
- Trama multiplexada
- Tasa tramas
- TDM multi-slot
- Inserción de pulsos
- Jerarquía digital
- Línea T1

Ref: 2-O-01 ☺☺☺ ? R Problema: 2.107

Dada la figura adjunta que representa un esquema multiplexado TDM con tres canales de entrada con una tasa de datos de 1 kbps en cada canal. La multiplexación se realiza a nivel de bit (1 bit es multiplexado en cada instante).



Calcula:

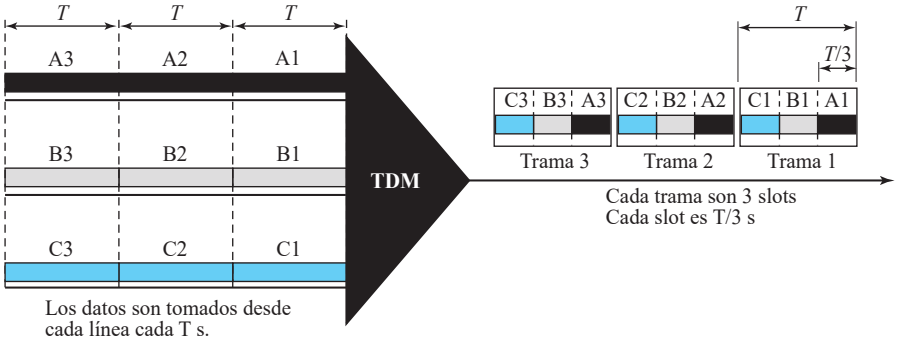
a) Duración de un slot de entrada

b) Duración de un slot de salida

c) Duración de una trama

Resolución:

Gráficamente:



a) La tasa de datos de cada canal de entrada es 1 kbps, por lo tanto, la duración de cada bit es $1/1000\,\text{s} = 10^{-3}\,\text{s} = 1\,\text{ms}$. En consecuencia, la duración de cada slot de entrada es 1 ms (la duración de 1 bit).

b) La duración de cada slot de salida es $1/3$ del tiempo del slot de entrada. Por lo tanto, la duración del slot de salida es $1/3$ ms.

c) Cada trama transporta tres slots de tiempo, por lo tanto, la duración de la trama de salida es $3 \cdot 1/3\,\text{ms} = 1\,\text{ms}$. La duración de la trama multiplexada es la misma que la duración de los canales de entrada.

Ref: 2-O-02 ☺☺☺ | Problema: 2.108

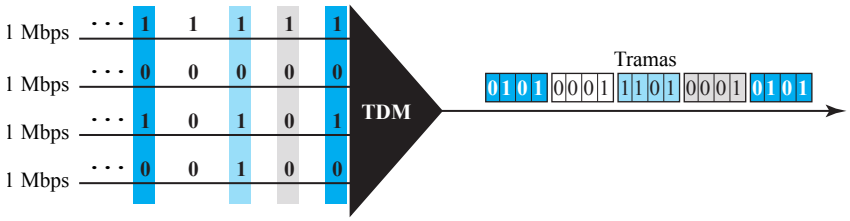
Dada la figura adjunta que representa un esquema multiplexado TDM con un flujo de datos en cada entrada y un flujo de datos de salida. La unidad de datos multiplexada es 1 bit. Calcula:

a) Duración de un bit de entrada.

b) Duración de un bit de salida.

c) Tasa de bits de salida.

d) Tasa de tramas de salida



Resolución:

a) La duración de un bit de entrada es la inversa de la tasa de bits: $1/1\,\text{Mbps} = 1\,\mu\text{s}$.

b) La duración de un bit de salida es $1/4$ de la duración de un bit de entrada, por tanto, $1/4\,\mu\text{s}$.

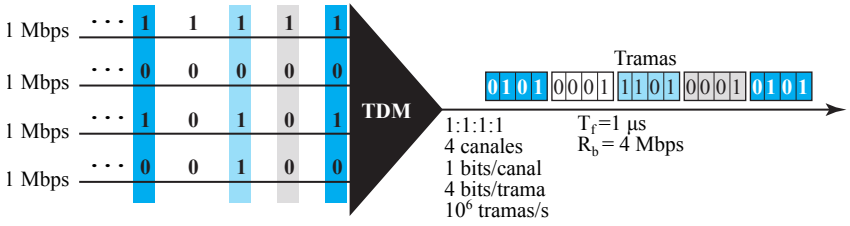
c) La tasa de bits de salida es la inversa de la duración de un bit de salida, $\frac{1}{1/4\,\mu\text{s}}$ ó $4\,\text{Mbps}$.

Otra forma de deducirlo es considerando que la tasa de salida debe de ser 4 veces más rápido que la tasa de entrada, por lo tanto, la tasa de salida es $4 \cdot 1\,\text{Mbps} = 4\,\text{Mbps}$.

d) La tasa de tramas de salida es siempre la misma que la tasa de entrada, por tanto, 10^6 tramas/s.

Podemos comprobar que como se están enviando 4 bits en cada trama, se puede verificar el resultado de la cuestión anterior multiplicando la tasa de tramas por el número de bits por trama.

Resumiendo:



Ref: 2-O-04 Problema: 2.109

Cuatro canales se multiplexan mediante TDM. Si cada canal envía 100 bytes/s, siendo el elemento multiplexado 1 byte por canal. Se pide:

a) Mostrar la trama multiplexada.

b) Tamaño de la trama multiplexada.

c) Tasa de tramas del enlace.

d) Duración de una trama.

e) Tasa de bit del enlace.

Sol: *a*) - *b*) 32 bits *c*) 100 tramas/s *d*) 1/100 s *e*) 3200 bps

Ref: 2-O-08 ☺☺☺ Problema: 2.110

Se necesita utilizar TDM síncrono para combinar 20 fuentes digitales, cada una de 100 kbps. Cada trama transporta 1 bit de cada fuente más un bit de sincronización. Se pide:

a) Tamaño de la trama de salida

b) Tasa de tramas de salida

c) Duración de la trama de salida

d) Tasa de datos de salida

e) Eficiencia del sistema (tasa de bits útiles respecto a bits totales)

Sol: *a*) 21 bits *b*) 10^5 tramas/s *c*) 10 μs *d*) 2,1 Mbps *e*) 0,95

Ref: 2-O-09 Problema: 2.111

Repite el Ejercicio 2.110 pero considerando que cada slot de salida contiene 2 bits de cada fuente.

Sol: *a*) 41 bits *b*) $5 \cdot 10^4$ tramas/s *c*) 20 μs *d*) 2,05 Mbps *e*) 0,975

Ref: 2-O-11 ☺☺☺ Problema: 2.112

Disponemos de un sistema formado por diez fuentes, seis con una tasa de bits de 200 kbps y cuatro con una tasa de bits de 400 kbps. Para combinar todas las fuentes utilizamos TDM multinivel sin bits de sincronización. Calcula:

a) Tamaño de la trama de salida en bits

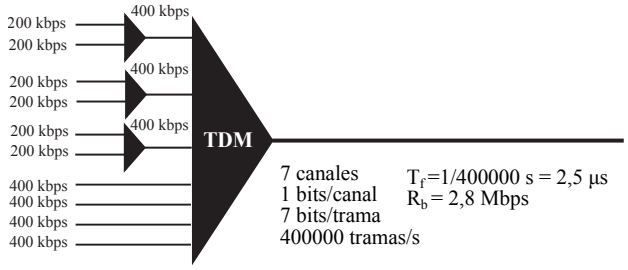
b) Tasa de tramas de salida

c) Duración de una trama de salida

d) Tasa de datos de salida

Resolución:

Combinamos seis fuentes de 200 kbps en tres de 400 kbps, por lo tanto, ahora disponemos de siete canales de 400 kbps.



a) Cada trama de salida contiene 1 bit de cada una de las siete líneas de 400 kbps:

$$LongitudTrama = 7 \cdot 1 = 7\,\text{bits}$$

b) Cada trama contiene 1 bit de cada una de las fuentes de 400 kbps:

$$TasaTramas = 400000\,\text{tramas/s}$$

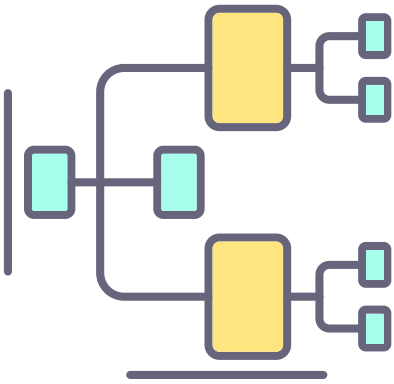
c) $DuracionTrama = \frac{1}{TasaTramas} = \frac{1}{400000} = 2{,}5\,\mu\text{s}$.

d) $TasaDatos = (400000\,\text{tramas/s}) \cdot (7\,\text{bits/trama}) = 2{,}8\,\text{Mbps}$.

También podemos calcular la tasa de datos de salida como la tasa de datos de entrada, ya que no hay bits de sincronización:

$$TasaDatos = 6 \cdot 200 + 4 \cdot 400 = 2{,}8\,\text{Mbps}$$

Ref: 2-O-12 ☺☺☺ ? R Problema: 2.113

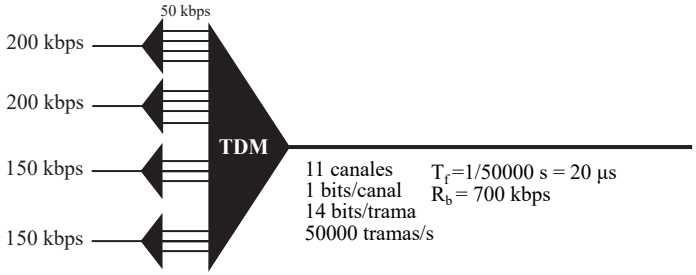


Disponemos de un sistema formado por cuatro canales, dos con una tasa de bits de 200 kbps y dos con una tasa de bits de 150 kbps y son multiplexados mediante TDM multi-slot, sin bits de sincronización.

a) Tamaño de la trama de salida en bits
b) Tasa de tramas de salida
c) Duración de una trama de salida
d) Tasa de datos de salida

Resolución:

El esquema del multiplexador sería el siguiente:



a) Si asignamos 50 kbps a cada slot, tenemos la relación 4:3, es decir, la trama de salida transporta 4 bits de cada una de las dos primeras fuentes (de 200 kbps) y 3 bits de cada una de las segundas dos fuentes (de 150 kbps):

$$LongitudTrama = 4 \cdot 2 + 3 \cdot 2 = 14\,\text{bits}$$

b) Cada trama transporta 4 bit de cada una de las dos fuentes de 400 kbps o 3 bits de cada una de las fuentes de 150 kbps:

$$TasaTramas = \frac{200000}{4} = \frac{150000}{3} = 50000\,\text{tramas/s}$$

c) $DuracionTrama = \frac{1}{TasaTramas} = \frac{1}{50000} = 20\,\mu\text{s}$.

d) $TasaDatos = (50000\,\text{tramas/s}) \cdot (14\,\text{bits/trama}) = 700\,\text{kbps}$.

También podemos calcular la tasa de datos de salida como la tasa de datos de entrada, ya que no hay bits de sincronización:

$$TasaDatos = 2 \cdot 200 + 2 \cdot 150 = 700\,\text{kbps}$$

Ref: 2-O-13 ☺☺☺ ? R Problema: 2.114

Disponemos de un sistema formado por dos canales, uno con una tasa de bits de 190 kbps y otro con una tasa de bits de 180 kbps y se multiplexan mediante TDM utilizando inserción de pulsos, sin bits de sincronización.

a) Tamaño de la trama de salida en bits

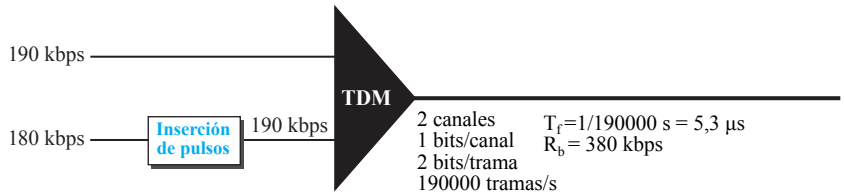
b) Tasa de tramas de salida

c) Duración de una trama de salida

d) Tasa de datos de salida

Resolución:

Mediante la **inserción de pulsos**, añadimos bits extra a la segunda fuente para igualar ambas tasas de bits en 190 kbps.



a) Cada trama de salida transporta 1 bit de cada fuente:

$LongitudTrama = 1 + 1 = 2\,\text{bits}$.

b) Cada trama transporta 1 bit de cada una de fuentes de 190 kbps:

$TasaTramas = 190000\,\text{tramas/s}$.

c) $DuracionTrama = \frac{1}{TasaTramas} = \frac{1}{190000} = 5{,}3\,\mu\text{s}$.

d) $TasaDatos = (190000\,\text{tramas/s}) \cdot (2\,\text{bits/trama}) = 380\,\text{kbps}$.

La tasa de bits de salida es mayor que la tasa de bits de entrada (370 kbps) debido a los bits extra añadidos a la segunda fuente.

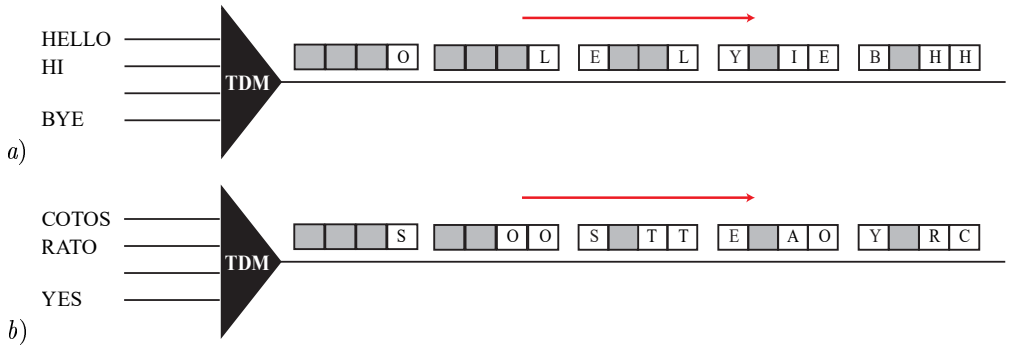
Ref: 2-O-14 ☺☺ ? R Problema: 2.115

Muestra el contenido de cinco tramas de salida para un multiplexor TDM síncrono que combina cuatro fuentes enviando los siguientes caracteres. *Nota*: considerar que los carácteres se envían en el mismo orden que son introducidos y que la tercera fuente está en silencio.

a)
- Fuente 1: HELLO
- Fuente 2: HI
- Fuente 3:
- Fuente 4: BYE

b)
- Fuente 1: COTOS
- Fuente 2: RATO
- Fuente 3:
- Fuente 4: YES

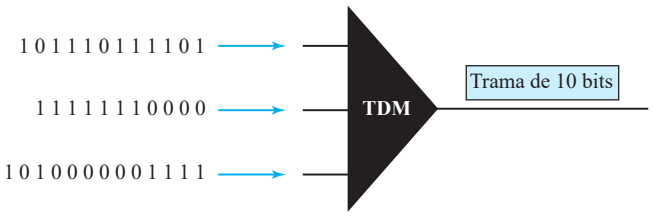
Resolución:



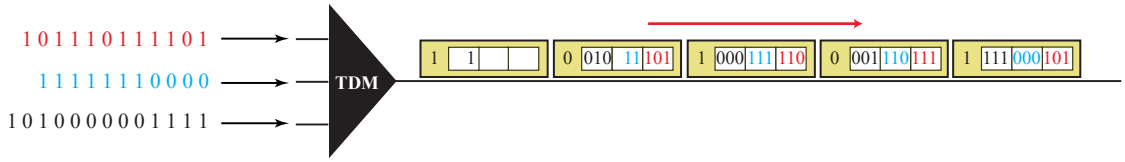
Ref: 2-O-16 | Problema: 2.116

La figura muestra un multiplexor en un sistema TDM síncrono. Cada slot de salida es de 10 bits (3 bits de cada fuente de entrada más 1 bit de sincronización). ¿Cuál será la secuencia de salida?

Nota: los bits alcanzan el multiplexor como muestra la flecha.



Resolución:



Ref: 2-O-19 Problema: 2.117

Compara la tasa de datos máxima de un canal sin ruido a 4 kHz utilizando:

a) Codificación analógica, por ejemplo, QPSK, con dos bits por muestra.

b) La línea T1 del sistema PCM.

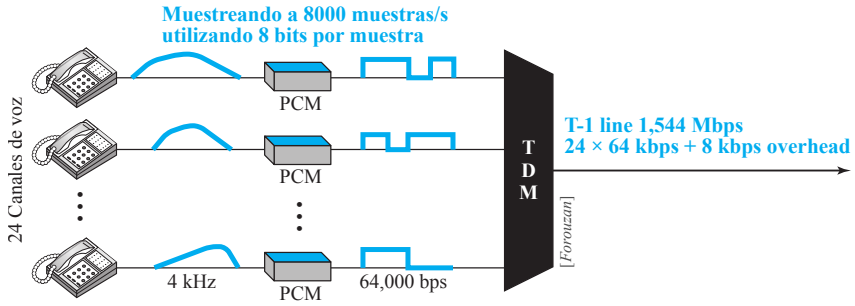
Sol: *a*) 16 kbps *b*) 64 kbps

Ref: 2-O-30 ☺☺☺☺ Problema: 2.118

En la salida de un multiplexor se dispone de un régimen binario de 60 Mbps. La trama está formada por 3, 5, 3 y 2 bits, respectivamente, correspondientes a cuatro canales de datos y otro bit, denominado A, que en las tramas pares se fija a 1 y en las impares lleva un canal de alarmas. ¿Qué capacidad, máxima, tendrá cada canal de entrada al multiplexor?

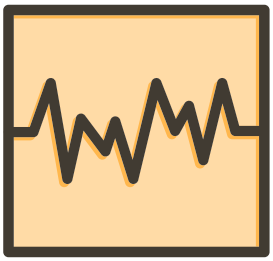
Sol: C_1 = 12,86 Mbps; C_2 = 21,43 Mbps; C_3 = 12,86 Mbps; C_4 = 8,57 Mbps; C_A = 2,14 Mbps

P



- Combinación de diferentes técnicas digitales y/0 analógicas

Ref: 2-P-03 | Problema: 2.119



La información de cuatro señales analógicas tiene que ser multiplexada y transmitida sobre un canal analógico que tiene un ancho de banda 400-3100 Hz. Cada una señales tiene un ancho de banda limitado a 500 Hz. Diseña un sistema de comunicación que permita la transmisión de estas cuatro fuentes analógicas sobre un canal telefónico, en los siguientes casos:

a) Multiplexión por división de frecuencias (FSM).
b) Multiplexión por división de tiempo, utilizando PCM y suponiendo 4 bits de muestreo.

Resolución:

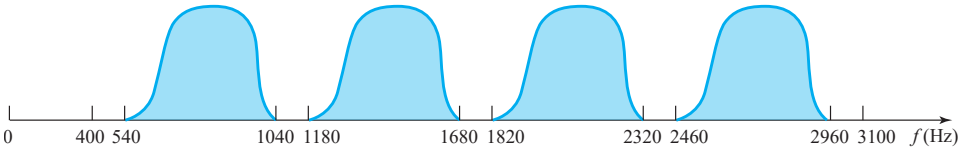
a) El ancho de banda disponible:

$$3100 - 400 = 2700\,\text{Hz}$$

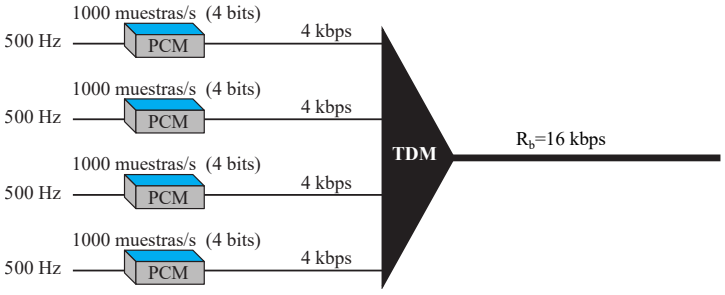
El ancho dedicado a los canales:

$$4 \cdot 500 = 2000\,\text{Hz}$$

por lo tanto, el resto de frecuencias $2700 - 2000 = 700\,\text{Hz}$ lo podemos repartir en bandas de seguridad.



b) Cada señal de 500 Hz debe ser muestreada a una frecuencia de 1 kHz. Si utilizamos 4 bits por muestra, cada señal individual necesita 4 kbps. Por lo tanto, para las cuatro fuentes, será necesario una tasa de datos total de 16 kbps.



Este esquema sólo podrá funcionar si la línea puede soportar una tasa de 16 kbps, sobre un ancho de banda de 2700 Hz, que dependerá del esquema de modulación. Por lo tanto, por ejemplo, 256-QAM, si suponemos $d = 0$, podemos comprobar, la señal proporcionaría una tasa en bits:

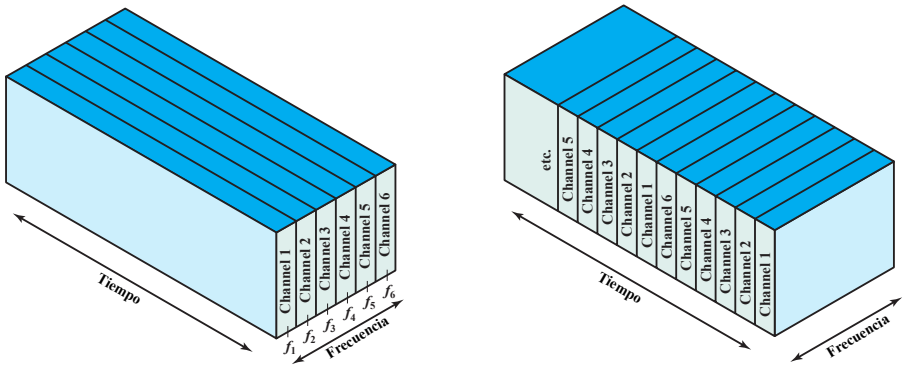
$$N = \frac{1}{1+d} \cdot r \cdot B = \frac{1}{1+0} \cdot 8 \cdot 2700 = 21{,}6\,\text{kbps}$$

Ref: 2-P-04 ☺☺☺ ? R Problema: 2.120

Parafraseando a Lincoln:

> « ... *all of the channel some of the time, some of the channel all of the time* ...»

Explica la frase referida a la figura:



(a) Multiplexión por división de frecuencia

(b) Multiplexión por división de tiempo

Resolución:

- En FDM, una parte del canal se asigna a una fuente, todo el tiempo.
- En multiplexión por división de tiempo, el canal entero se asigna a una fuente, una porción de tiempo.

Ref: 2-P-06 Problema: 2.121

Explica, en términos de control de enlace lógico y nivel físico, cómo se contemplan los conceptos de control de error y control de flujo en multiplexión por división de tiempo síncrona.

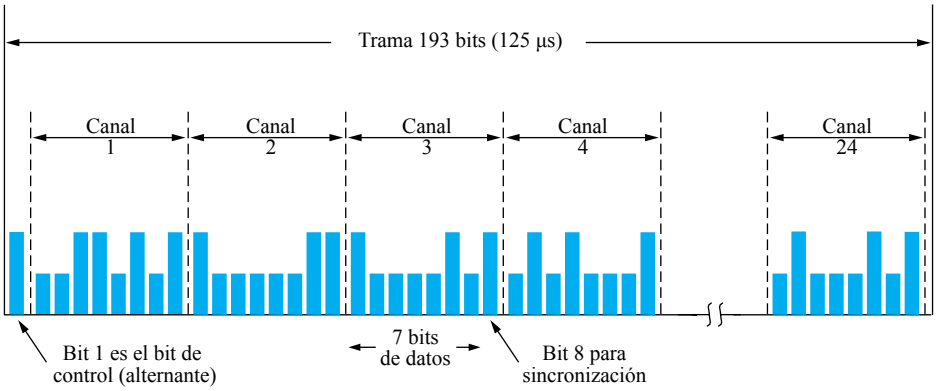
Resolución:

TDM síncrona es una técnica utilizada para dividir y compartir el medio mediante la aplicación de ranuras de tiempo y utilizadas por los dispositivos de entrada. La función de TDM está centrada en el medio y no en la información que viaja por el medio.

En definitiva, TDM no realiza ningún control de error ni control de flujo.

Ref: 2-P-07 ☺☺☺ ? R Problema: 2.122

Uno de los 193 bits en el formato de trama del servicio DS-1 se utiliza para sincronización de trama. Explica su finalidad.



Resolución:

Ese bit forma lo que se denomina canal de sincronización, ya que transporta un patrón de bits repetitivos utilizado por el receptor para determinar si ha perdido la sincronización. El patrón de bits es 01010101···. Si un receptor pierde la sincronización, mediante el escaneo del patrón de bits, puede lograr la resincronización. Este patrón utilizado es improbable que ocurra en datos digitales.

Ref: 2-P-08 ☺☺☺☺ ? R Problema: 2.123

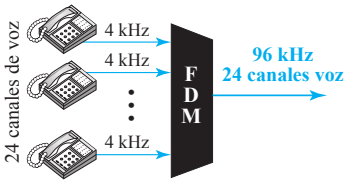
Veinticuatro señales de voz se multiplexan sobre un par trenzado (línea telefónica).

a) ¿Cuál es el ancho de banda necesario para FDM?

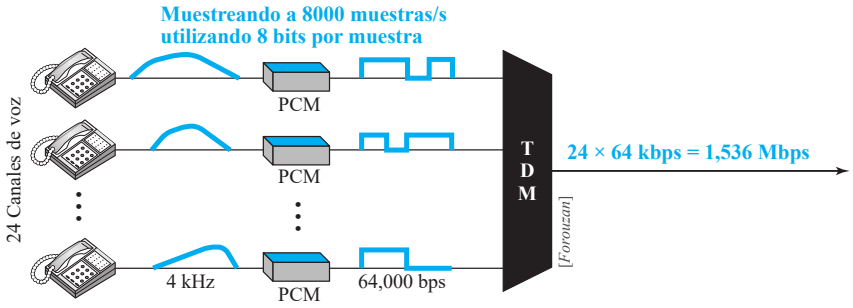
b) Suponiendo una eficiencia de ancho de banda (porcentaje de tasa de datos sobre ancho de banda) de 1 bps/Hz, ¿cuál es el ancho de banda necesario para TDM utilizando PCM?

Resolución:

a) Asumiendo 4 kHz por señal de voz, el ancho de banda necesario con FDM es $24 \times 4 = 96\,\text{kHz}$.



b) Con PCM, cada canal de voz necesita una tasa de datos de 64 kbps, por lo tanto, para el total de señales, una tasa de datos de $24 \times 64 = 1{,}536\,\text{Mbps}$. Con una eficiencia de 1 bps/Hz, obviamente, se necesita un ancho de banda de 1,536 MHz.

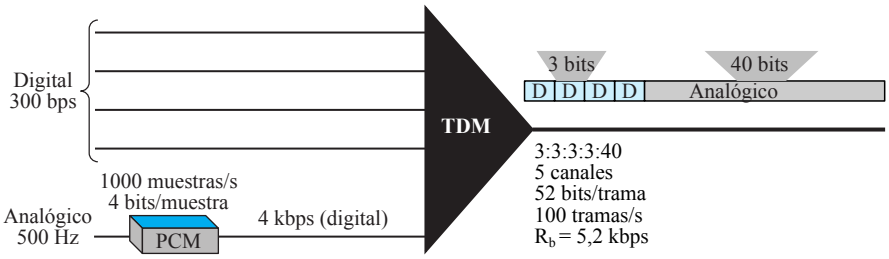


Ref: 2-P-09 | Problema: 2.124

Diseña un sistema TDM con capacidad para acomodar cuatro entradas síncronas de 300 bps y una entrada analógica con un ancho de banda de 500 Hz. Suponemos un muestreo de la señal analógica a 4 bits por muestra en PCM.

Resolución:

La señal analógica se convierte a una señal PAM de 1 kHz, con 4 bits por muestra, por lo tanto, se convierte en una secuencia digital PCM de 4 kbps.

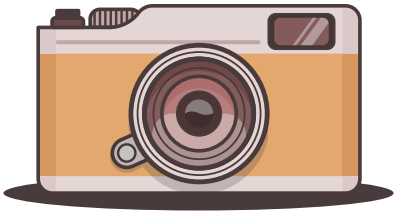


El sistema multiplexado estará formado por una trama de 52 bits, formada por 40 bits procedentes de la señal analógica y 3 bits procedentes de cada señal digital. El canal multiplexado tendrá una tasa de tramas de 100 tramas/s ó 5,2 kbps.

- En relación a PCM, la fuente transmite a (100 tramas/s) × (40 bits/trama) = 4 kbps.
- Cada fuente digital transmite a (100 tramas/s) × (3 bits/trama) = 300 bps.

Ref: 2-P-15 | ☺☺☺☺☺ | ? | R | Problema: 2.125

Una empresa dispone de un banco de imágenes en movimiento que desea ofrecer a sus clientes. Para ello acuerda con la compañía telefónica la posibilidad de que sus clientes accedan a esa base de datos a través del par trenzado que lleva el teléfono a sus casas, cuyo ancho de banda va de 0-150 kHz. Por la relación señal-ruido (S/N) presente, el máximo número de niveles de señalización posible es de 32. La empresa inicia un proceso de decisión del sistema más adecuado de digitalización y codificación para poder transmitir la imagen por el medio de transmisión disponible. El método que utiliza es el de muestreo y codificación (PCM) usando 210 niveles de codificación (10 bits por muestra).



a) Conociendo que el ancho de banda utilizado por la imagen en movimiento es de 0 a 6 MHz, ¿cuál será la velocidad de transmisión de salida del codificador?

b) ¿Podrá enviarse esa señal digitalizada por el par telefónico indicado? Razona la respuesta.

c) Con técnicas de compresión y eliminación de redundancias conseguimos reducir la velocidad de transmisión necesaria a 1,44 Mbps. ¿Podrá transmitirse un canal vocal (0-4 kHz) codificado con PCM simultáneamente en el mismo par de hilos? Razona la respuesta.

d) Propón un sistema para transmitir ambas señales (imagen y voz) por el mismo par de hilos. Especifica, los métodos que usarías de codificación, modulación y multiplexación. Haz un esquema si es necesario.

Resolución:

a) La velocidad de transmisión de la imagen en movimiento (analógica) a la salida del codificador utilizando 10 bits de muestreo:

$$N = f_s n_b = 2 \cdot 6 \cdot 10 = 120\,\text{Mbps}$$

b) La tasa de transmisión máxima del sistema telefónico en las condiciones especificadas:

$$C = 2B \log_2 L = 2 \cdot 150 \log_2 32 = 1{,}5\,\text{Mbps}$$

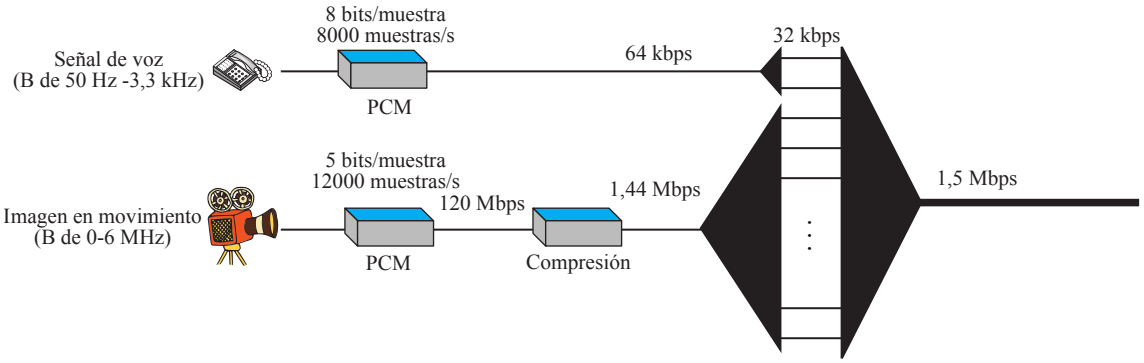
por lo que, claramente, no tiene capacidad suficiente para la transmisión de la imagen en movimiento.

c) Un canal de voz analógico de 4 kHz, muestreado a 8 bits por muestra, produce una tasa de 64 kbps. Por lo tanto, la tasa total, de ambos canales:

$$N = 1{,}5 + 64 \cdot 10^{-3} \approx 1{,}5\,\text{Mbps}$$

que, aparentemente, si puede ser transmitida por el canal telefónico anterior.

d) Una posible solución es el siguiente esquema propuesto:



Donde la trama del canal multiplexado está formada por 2 canales de voz y 45 canales de imagen.

Ref: 2-P-21 ☺☺☺ Problema: 2.126

El rango de frecuencias de la voz humana va desde los 16 Hz hasta los 20 kHz. Las compañías telefónicas utilizan la porción más significativa de frecuencia de su espectro, 4000 Hz, para enviar conversaciones entre usuarios. Esta degradación en la calidad de la conversación permite al enlace de transmisión ahorrar ancho de banda de una forma significativa. Utilizando jerarquía a tres niveles demultiplexación (12:1, 5:1 y 10:1).

a) ¿Cuántos conversaciones de voz puede transportar este sistema?

b) ¿Cuál será la capacidad (en Hertz) final de transmisión de este sistema?

Resolución:

a) El número de canales, en la jerarquía a tres niveles, es:

$$12 \times 5 \times 10 = 600$$

b) $Capacidad = 600 \times 4\,\text{kHz} = 2{,}4\,\text{MHz}$

Ref: 2-P-31 Problema: 2.127

Tenemos tres canales de entrada digitales de velocidades 10, 20 y 40 bps, respectivamente. Diseña un multiplexor.

Sol: *a*) 1 : 2 : 4 *b*) 7 canales *c*) 10 bits/canal *d*) 70 bits/trama *e*) 1 trama/s $R_b = 70\,\text{bps}$ *f*) ABBCCCC

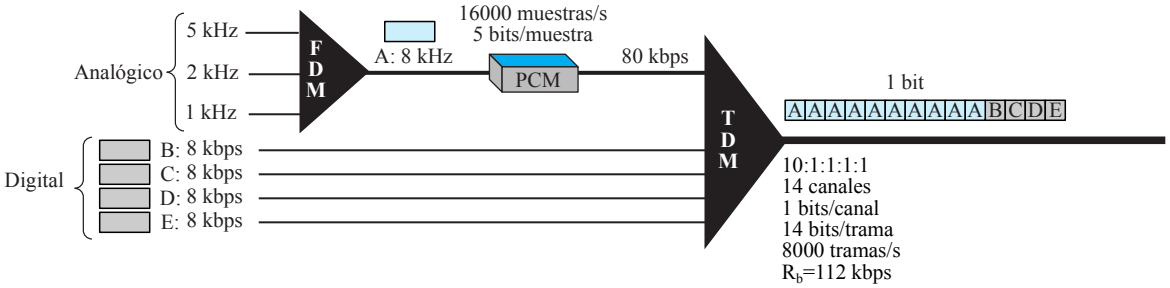
Ref: 2-P-37 | Problema: 2.128

Supongamos la integración de tres fuentes analógicas y cuatro fuentes digitales idénticas mediante multiplexión por división de tiempo, como se muestra en figura. Las líneas analógicas con ancho de banda 5 kHz, 2 kHz y 1 kHz, respectivamente, son muestreadas, cuantizadas y codificadas con 5 bits. Las líneas digitales son multiplexadas y cada una tiene una tasa de datos de 8 kbps. Diseña el multiplexor.

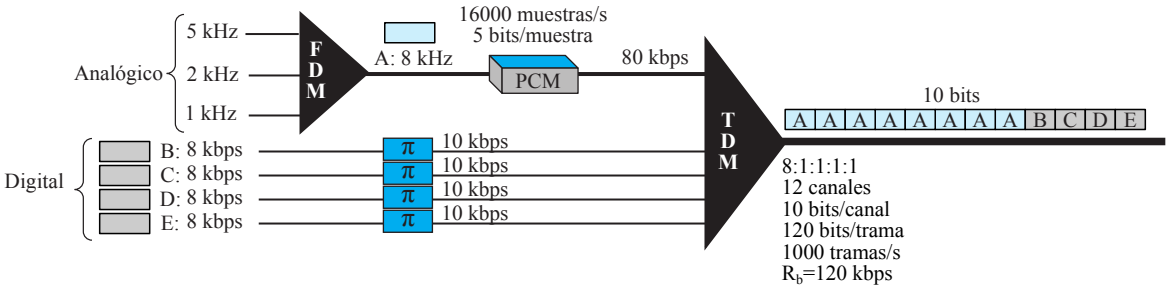
Resolución:

Tenemos varias soluciones para su resolución:

a) Multislot:



b) Multislot + inserción de pulsos:



Ref: 2-P-40 Problema: 2.129

Supongamos un multiplexor por división de tiempo con un tiempo de trama de 26 μs. Cada canal de usuario tiene 6 bits, y cada trama tiene 10 bits de sobrecarga (overhead) de información. Suponiendo que la línea de transmisión transporta 2 Mbps de información. ¿Cuántos canales de usuario pueden ser acomodados?

Sol: 7 canales