

Capítulo 2 Capa física

Resumen

La capa física es la responsable de dar sentido a las características de las señales que representan los bits transportados de un dispositivo a otro a través de un canal de comunicaciones (de un medio físico). En el modelo de OSI, es responsable de estandarizar las propiedades eléctricas, mecánicas y de procedimiento de las interfaces utilizadas para conectar los dispositivos al canal.

En este capítulo se presentan las características básicas de algunos de los medios físicos más utilizados en redes de computadoras así como una breve introducción a los sistemas de comunicaciones que sirvieron como infraestructura de base a las redes de computadoras.

2.1 Medios de transmisión

2.1.1 Introducción

Como se ha comentado en el capítulo anterior, la energía que transportan las señales que representan los bits entre un dispositivo y otro, se propaga a través de medios físicos. Cada medio tiene distintas propiedades que inciden de manera distinta sobre las señales transportadas y, por consiguiente, afectan las características de las redes a ser desplegadas. Algunas de estas propiedades son:

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Tipo de conexión | Modo de transmisión |
| Características de transmisión | Cobertura |
| Características de propagación | Costo |

El **tipo de conexión** se refiere a la manera en la que los dispositivos¹⁰ acceden y comparten el **medio**. Consideraremos únicamente dos posibilidades. En la primera, llamada *punto a punto*, el medio está dedicado a la comunicación entre dos dispositivos, como se muestra en la figura 2.1(a).

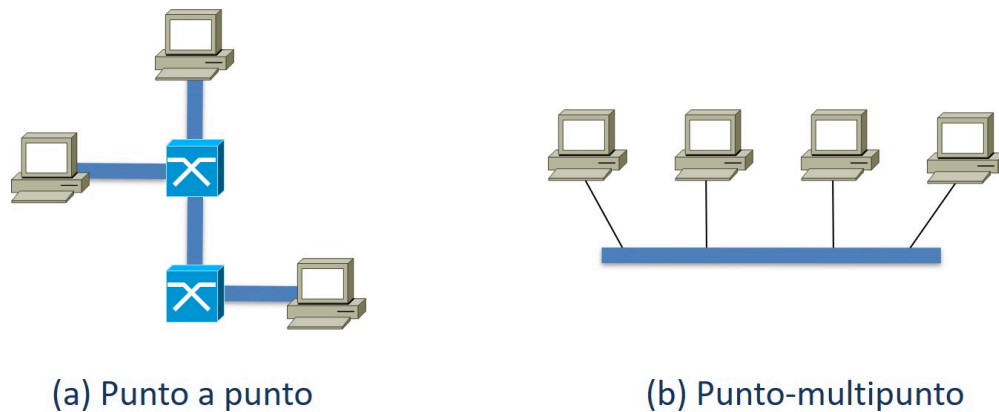


Figura 2.1: Tipos de conexiones

El otro tipo de conexión considerado en este documento, son las conexiones punto-multipunto (figura 2.1(b)). En éstas, se asume que los dispositivos en la red comparten el medio. Frecuentemente se trata de un canal de difusión en el que, cuando un dispositivo está transmitiendo un mensaje, todos los demás conectados al medio, lo escuchan. Veremos ejemplos concretos de este tipo de conexión en capítulos posteriores.

Dado que varios dispositivos comparten el medio, se hace indispensable contar con protocolos de comunicaciones. En este caso, será necesario definir las reglas para evitar conflictos entre dispositivos que quieran utilizar el canal simultáneamente.

El **modo de transmisión**, ejemplificado en la figura 2.2, se refiere a la dirección de la comunicación entre los dispositivos, la cual puede ser:

Simplex. Si la comunicación se da solamente en una dirección. En la práctica, existen muy pocos sistemas de comunicaciones que operen en modo simplex, pues en la mayoría de los casos, se espera al menos el acuse de recibo de los mensajes.

Half dúplex. Se da cuando la comunicación es bidireccional, pero sólo puede haber un mensaje a la vez en el canal de comunicación, por lo que los mensajes entre los nodos comunicantes deben alternarse. Un ejemplo familiar son las comunicaciones *push to talk* usadas en los *walkie-talkie*. Se trata, pues, de una forma de multiplexaje en el tiempo (TDM).

Full dúplex. En este caso, la comunicación también es bidireccional pero el medio permite que haya mensajes viajando en ambas direcciones simultáneamente, o bien, se tienen dos medios (por ejemplo, dos cables), uno en cada dirección.

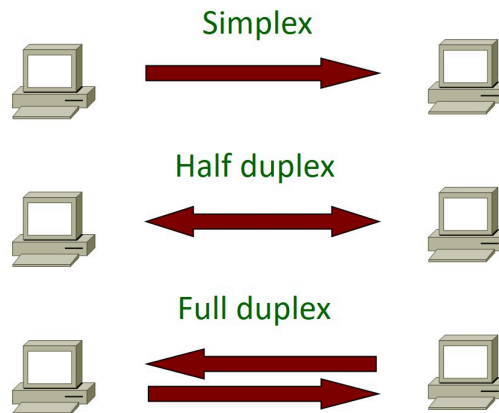


Figura 2.2: Modo de transmisión

Las **características de transmisión y de propagación** están directamente relacionadas con las características físicas del canal de comunicación. Estas características hacen que, en general, la señal que se recibe sea distinta a la transmitida.

El teorema de Fourier demuestra que una señal periódica (y al menos en teoría, una señal finita puede imaginarse como periódica) se puede formar por una suma de senos y cosenos que son múltiplos de su frecuencia fundamental. En la figura 2.3, se representa del lado izquierdo una señal como las variaciones de voltaje (o corriente) de la señal en el tiempo. En el lado derecho se representa la misma señal como los componentes senoidales y cosenoidales en el dominio de la frecuencia (el eje de las abscisas es frecuencia). Cada espiga (llamada armónica) tiene una determinada amplitud.

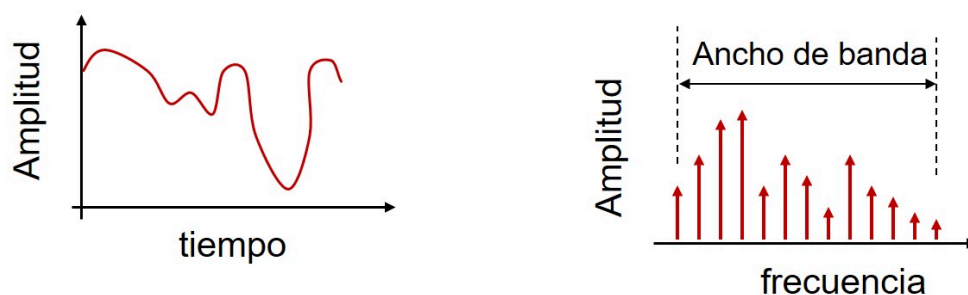


Figura 2.3: Una señal representada en el dominio del tiempo (figura de la izquierda) y de la frecuencia (figura de la derecha)

Vista en el dominio de la frecuencia, el *ancho de banda de una señal* es el rango de las frecuencias que la conforman, es decir, la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja de sus componentes.

Desgraciadamente, el medio por el que viaja la señal ofrece resistencia a la propagación de la energía, por lo que las señales se *atenúan*. En general, no permite que todas las frecuencias se propaguen de igual manera¹¹. La velocidad a la que se propagan varía con la frecuencia y, de hecho, algunas se atenúan tanto que ya no son perceptibles. Por ello, las señales se *distorsionan* en el medio.

Así, el medio es una especie de filtro que bloquea algunos de los componentes de la señal. Llamamos **ancho de banda del medio** (a veces lo llamaremos respuesta en frecuencia) al **conjunto de frecuencias que pueden viajar por éste sin que se atenúen sensiblemente**, es decir, las frecuencias que no distorsionan sensiblemente a la señal.

La figura 2.4, tomada de [5], ejemplifica el impacto que las diferencias entre el ancho de banda de la señal y el ancho de banda del medio puede tener en la información transportada. En el primer renglón se muestra la señal cuadrada que representa el valor ASCII de la letra "b" en binario y a su derecha se presentan sus principales armónicas.

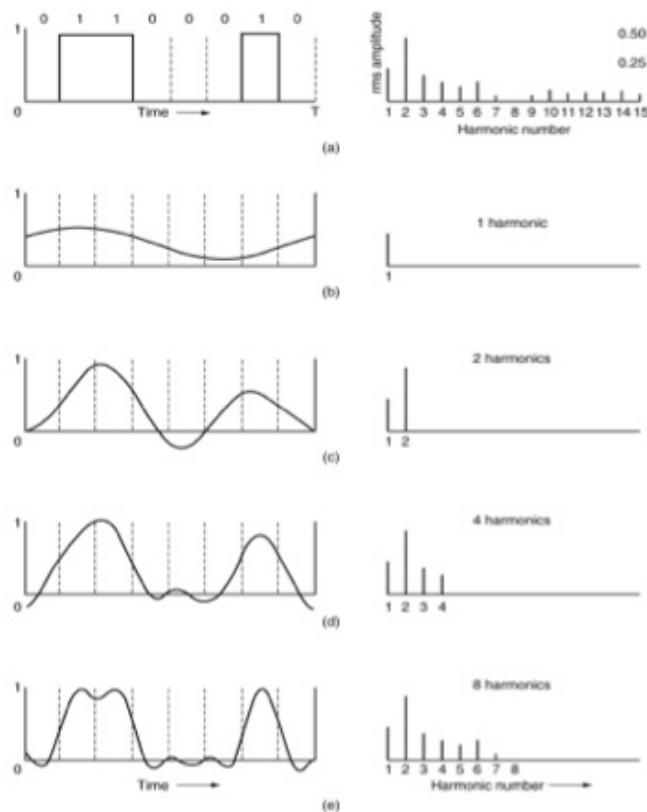


Figura 2.4: *Impacto del ancho de banda del canal sobre una señal*

En los renglones subsecuentes de la figura, se muestra qué ocurre con la señal si el ancho de banda del medio permite el paso de sólo 1, 2, 4 u 8 armónicas. Se observa claramente la distorsión (la diferencia entre la forma de la señal original y la recibida), aunque con ocho

armónicas, ya se puede distinguir el mensaje original.

El hecho de que no se necesiten todas las armónicas para poder interpretar la señal original, es muy importante para diseñar sistemas de comunicaciones eficientes. Por ejemplo, **el rango de frecuencias que pueden ser emitidas por las cuerdas vocales humanas**, típicamente va de los **200 Hz (sonidos muy graves) a los 7,500 Hz (sonidos muy agudos)**, o sea, un ancho de banda de alrededor de 7,300 Hz.

Sin embargo, el rango de frecuencias necesario para comprender con claridad una conversación, va de los 300Hz a los 3,400Hz. Por esta razón, las viejas redes utilizadas exclusivamente para telefonía, introducían filtros para cortar la señal en esas frecuencias, reduciendo el **ancho de banda del medio a 3,100 Hz por conversación telefónica**. Si el medio tiene un ancho de banda mayor (como es el caso), éste puede transportar simultáneamente varias conversaciones con un mecanismo de multiplexaje.

Para cerrar este tema, conviene mencionar que el concepto de ancho de banda no es privativo de los canales de comunicación. El oído humano, por ejemplo, tiene una respuesta en frecuencia de 20Hz a 20,000Hz, es decir, el tímpano (de una persona joven y sana) vibra y genera estímulos en el cerebro que son interpretados como sonidos, dentro de ese rango de frecuencias exclusivamente.

Baudaje y velocidad de transmisión

El baudaje representa el máximo número de *símbolos*, es decir, de cambios de estado que puede soportar un canal de comunicaciones. Por ello, el baudaje es proporcional al ancho de banda del medio.

Como se verá más adelante, en comunicaciones digitales cada símbolo puede tener uno o más bits de información¹², por lo que el baudaje y la velocidad de transmisión medida en bits por segundo, no necesariamente son iguales.

En cualquier caso, a condiciones iguales, a mayor ancho de banda, mayor es la velocidad de transmisión. Harry Nyquist demostró que existe un límite en la cantidad de datos que se pueden transmitir en el medio. Si el canal tiene B baudios, el "pulso más estrecho" que se puede transmitir es $1/2B$, por lo que para un símbolo que puede tomar M valores distintos, (por ejemplo, M niveles de voltaje), la velocidad máxima de transmisión del canal es:

$$C = 2B \log_2(M) \text{ bps}$$

Ejemplo 2.1 Si el ancho de banda de una señal es de $B = 3,200$ Hz y los símbolos pueden tomar $M = 8$ valores, la capacidad máxima teórica de transmisión es de:

$$C = 2 \times 3,200 \times \log_2(8) = 2 \times 3,200 \times 3 = 19,200 \text{ bps}$$

La fórmula de Nyquist sugiere que se puede incrementar indefinidamente la velocidad de transmisión de un canal con B símbolos aumentando indefinidamente el número M de niveles de la señal. En la práctica, sin embargo, esto no es posible porque, como se mencionó en el capítulo anterior, las señales se ven afectadas por interferencias (llamadas ruido) que siempre están presentes en los canales de comunicaciones.

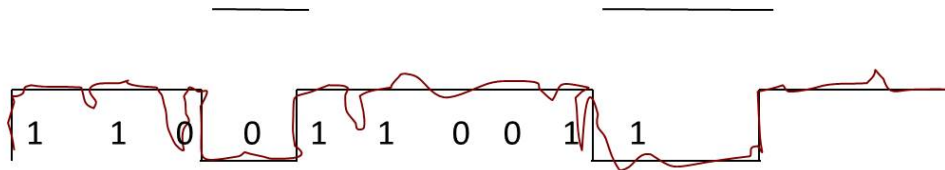


Figura 2.5: *Ruido aditivo sobre una señal digital*

El ruido en la figura 2.5 es la señal roja sobre puesta a la señal binaria. Si el ancho de cada pulso disminuye (es decir, si el baudje aumenta), el ruido afecta una mayor parte del símbolo binario, y hasta puede llegar a anularlo. Considere, por ejemplo el pico de la señal de ruido cercana al tercer bit.

Así mismo, si la distancia entre los niveles de la señal binaria es muy pequeña, el ruido impediría distinguir con precisión qué nivel (y por lo tanto, qué valores binarios) se está transmitiendo.

Claude Shannon relacionó en uno de sus principales trabajos, la velocidad de transmisión máxima que un canal con ancho de banda B podría alcanzar considerando el ruido al que está expuesta la señal. Su fórmula, conocida como el **límite de Shannon**, es:

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

La fracción S/N , es la relación de la potencia de la señal dividida entre la potencia del ruido. No tiene unidades y se le conoce como SNR, *signal to noise ratio*.

Ejemplo 2.2 Considere una señal de $B = 3,200$ Hz y una relación señal a ruido de 1000 (es decir, 30 dB). La capacidad del canal en bps es de:

$$C = 3,200 \times \log_2(1 + 1000) = 3,200 \times \log_2(1001) = 3,200 \times \frac{\log_{10} 1001}{\log_{10} 2} \approx 31.9 \text{ kbps}$$

2.1.2 Medios guiados

Las señales de los mensajes deben propagarse a través de un canal o medio de transmisión. Tanenbaum clasifica estos **medios** en **guiados** y no guiados [5]. En los primeros, **la energía se propaga por un medio físico acotado**, como los cables telefónicos y las fibras ópticas. En los **medios no guiados** **la energía suele propagarse en forma de señales electromagnéticas**.

Par trenzado

El par trenzado es uno de los medios más antiguos y populares en las redes de computadoras. **Está formado por un par de conductores (típicamente de cobre) recubiertos de plástico que se entrelazan entre sí** como se muestra en la figura 2.6.

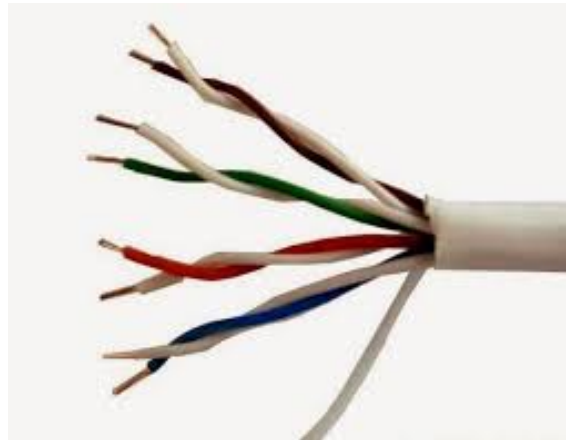


Figura 2.6: Cable con pares trenzados no blindados

Recordemos que un alambre metálico funciona como una antena: cuando se hace pasar corriente eléctrica a través de él, se induce una señal electromagnética (la famosa ley de la mano derecha). Así mismo, el alambre puede captar campos electromagnéticos del exterior, que se convertirán en interferencia para la señal transportada.

Al torcer el cable, las emisiones electromagnéticas en cada conductor se cancelan entre sí, reduciendo la diafonía, es decir, la interferencia que la señal transmitida en ese par, genera en pares adyacentes. Al mismo tiempo, se reduce la interferencia generada por las señales electromagnéticas circundantes: el campo es capturado por los dos conductores más o menos en la misma proporción, por lo que la diferencia en intensidad entre uno y otro conductor casi no se ve afectada¹³ [9].

Como veremos más adelante, la mayor parte de las redes de acceso telefónicas (llamadas par de abonado, o de última milla) utilizan pares trenzados para enlazar a los suscriptores con las centrales telefónicas. Estas redes tienen tal cobertura que, a decir de Tanenbaum, si se extendieran juntos todos los despliegues de pares de abonado, se crearía un cable que podría ir a la Luna y regresar a la Tierra ¡mil veces! [5]

Aunque **la señal se atenúa aceleradamente con la distancia**, el par trenzado tiene un ancho de banda relativamente amplio, por lo que su uso en redes locales también es sumamente popular, sobre todo en lo que se conoce como cableado estructurado. Se trata de los tendidos de cable que se despliegan por ductos y canaletas *ex profeso* desde los cuartos de distribución donde se proveen los equipos de conectividad a la red, hasta las rosetas en las paredes de las oficinas, en las que se conectan los equipos terminales.

Las primeras redes se desplegaron con los mismos cables que se utilizaban para los servicios de telefonía; a estos cables se le llama UTP (*unshielded twisted pair*) de categoría 3. La categoría está relacionada con el calibre o grosor del cable (menos de un milímetro de diámetro) y con el número de vueltas por centímetro en el trenzado.

Como veremos más adelante, **las redes locales ethernet que utilizan par trenzado, están limitadas a 100 metros**. A esta distancia, con un cable UTP categoría 3 se puede transmitir a velocidades de 10 Mbps. En los años 90 las redes locales a 100 Mbps se empezaron a popularizar. Para alcanzar estas velocidades, se pueden usar varios pares categoría 3 en paralelo, pares trenzados con blindaje (STP, *shielded twisted pair*)¹⁴ o pares UTP categoría 5. Estos son muy similares a los de categoría 3 pero tienen un número mayor de vueltas por centímetro, lo que disminuye la diafonía.

En la actualidad las redes locales alambradas operan a velocidades de 1 y 10 Gbps¹⁵. En estas redes se utilizan cables de categoría 5e, 6, y 7. En estos últimos, cada par tiene un blindaje típicamente de aluminio, como se muestra en la figura 2.7, lo que reduce aún más la diafonía, aunque estos cables utilizan conectores especiales y son mucho más costosos que los anteriores.

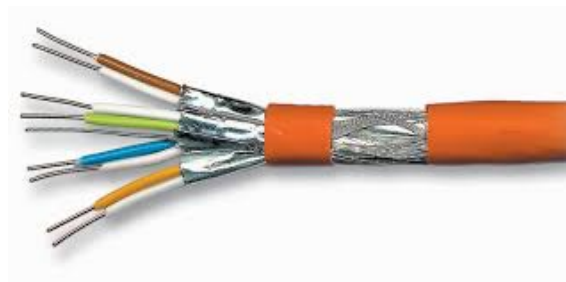


Figura 2.7: Cable trenzado Cat 7.

Cable coaxial

El cable coaxial es el tipo de medio por el que entregaban sus servicios la mayoría de los operadores de televisión por cable¹⁶. Se trata de un conductor central de cobre rodeado por otro conductor en forma de malla circular y separados por un medio dieléctrico (ver figura 2.8).

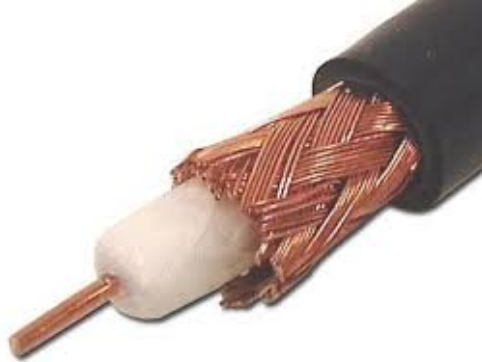


Figura 2.8: Cable coaxial

El blindaje externo funciona como una jaula de Faraday, por lo que este medio es altamente resistente a las interferencias electromagnéticas. Esto y el hecho de que el núcleo de cobre sea mucho más grueso que el par trenzado, permite transportar señales a una distancia mucho mayor y con más ancho de banda.

Como se verá posteriormente, las primeras redes locales Ethernet utilizaban un cable coaxial con impedancia de $50\ \Omega$. Sin embargo, los despliegues de red local con cable coaxial son costosos, intrusivos y difíciles de manipular por lo que han sido casi totalmente sustituidos por cables UTP o por redes inalámbricas.

Las redes de televisión por cable utilizan un cable con impedancia de $75\ \Omega$. Cuando estos operadores también ofrecen servicios de acceso a Internet, se hace un multiplexaje en frecuencia sobre el ancho de banda del medio. Algunas frecuencias se utilizan para enviar datos de la red al usuario (canal de bajada), algunas frecuencias para el sentido contrario (canal de subida) y las frecuencias restantes se utilizan para enviar las señales de video digitalizado.

Fibra óptica

La fibra óptica es, por mucho, la tecnología más eficiente para la transmisión de información en medios cableados. A través de ella no viajan señales eléctricas sino haces de luz por lo que es inmune a la interferencia electromagnética. De esta manera, se pueden transmitir señales con

mucho mayor ancho de banda, a grandes distancias y sin necesidad de regenerar o amplificar la señal.

Su funcionamiento está basado en las propiedades de refracción y reflexión de la luz cuando encuentra un medio con densidades ópticas distintas. La fibra óptica está formada por un tubo rígido de silicio muy delgado de alta pureza llamado núcleo (*core*). El núcleo está rodeado por otro tubo de silicio llamado revestimiento (*cladding*) fabricado con impurezas para alterar su densidad (ver figura 2.9).



Figura 2.9: Fibra óptica formada por núcleo, revestimiento y recubrimiento.

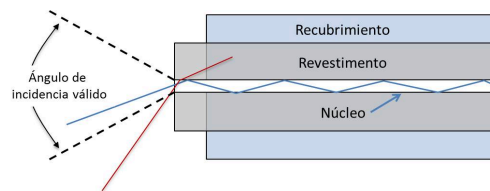


Figura 2.10: Propagación de un haz de luz en la fibra

Al inyectar un haz de luz, éste viajará por el núcleo. Si el haz choca con el revestimiento, la diferencia entre los índices de refracción (las densidades ópticas) hace que el haz sea reflejado, por lo que la señal viaja en forma de zig-zag como se muestra en la figura 2.10. El ángulo de ataque o ángulo de incidencia es fundamental. Si rebasa el ángulo permitido, el haz no se reflejará, sino que será refractado en el revestimiento y la señal se perderá.

Un efecto curioso de este desplazamiento en zig-zag, es que aunque la señal viaja a la velocidad de la luz, el haz recorre una distancia mucho mayor que el tamaño físico del medio (la fibra). Esto hace que la velocidad efectiva de propagación en una fibra óptica sea ligeramente menor que la velocidad de propagación en alambres de cobre, que es del orden de $\frac{2}{3}$ la velocidad de la luz, es decir, $\approx 200,000 \text{ km/s}$.

Las fibras ópticas con un núcleo muy pequeño (menor a 10 micras) tienen prácticamente un solo ángulo de incidencia y son llamadas monomodales. Las fibras llamadas multimodales tienen un núcleo mucho mayor (alrededor de 50 micras) y cuando un haz de luz es insertado a la fibra, éste lo hace con varios ángulos de incidencia. El hecho de que haya varias trayectorias fluyendo simultáneamente, hace que éstas interfieran entre sí, lo que limita un tanto la velocidad de

transmisión, pues el efecto de la interferencia dependerá tanto de la duración del pulso, como la distancia máxima que pueda recorrer la señal antes de que la degradación sea dominante. A esta interferencia se le conoce como *dispersión cromática*.

En teoría, una sola fibra óptica monomodal puede transmitir señales en el orden de los terabits por segundo. En la práctica, hoy en día se pueden transmitir señales a más de 100 Gbps en decenas de kilómetros.

Sin embargo, las fibras monomodales son mucho más costosas de fabricar y además la fuente de luz debe ser sumamente precisa para poder inyectar el haz en el muy pequeño ángulo de incidencia permitido. Estas fuentes de luz consisten de lasers de alta precisión. En cambio, en las fibras multimodales la señal puede ser generada por un LED de bajo costo.

Además de los costos de la fibra y las fuentes de luz, los despliegues de redes de fibra son más costosos que los de cobre pues la fibra es más frágil y puede romperse, es mucho más difícil repararla y su despliegue, sobre todo para redes de área amplia, requiere de personal altamente especializado.

Por otra parte, las bondades de la fibra óptica rebasan por mucho las restricciones de costo y complejidad en el despliegue. Además de las ventajas de velocidad ya mencionadas, conviene destacar las siguientes características de las redes de fibra óptica:

- Mucho menor atenuación de la señal que en medios eléctricos (hay menor resistencia) permite transmitir a distancias mucho mayores sin necesidad de amplificación.
- Son inmunes a factores ambientales como la oxidación, la interferencia generada por rayos eléctricos, etc.
- Son más seguras pues es prácticamente imposible interferir la señal mientras ésta se propaga del origen al destino

2.1.3 Medios no guiados

2.2 Sistemas de comunicaciones

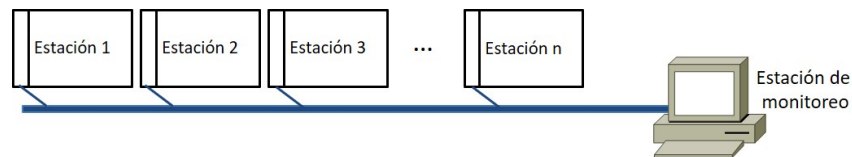
2.3 Codificaciones

2.4 Problemas

Problema 2.1 Proporcione dos ejemplos de sistemas que utilizan conexiones punto a punto y multipunto.

Problema 2.2 Una línea de ensamble en una planta de manufactura, tiene un sensor de presencia en cada una de sus diez estaciones de trabajo como se muestra en la figura. Los sensores envían su estado (la estación está libre u ocupada) cada 10 seg y en secuencia (primero el 1, después el 2, etc.) a un centro de monitoreo. Un mensaje de un sensor, con todos sus campos, es de 32 bytes

La velocidad en el cable que conecta los sensores con la estación de monitoreo, es de 256 kb/s. Un mensaje de un sensor.



- ¿Qué tipo de conexión y qué modo de transmisión tiene esta red? Justifique brevemente su respuesta. (Ayuda: Las opciones son Punto a punto, punto a multipunto, simplex, half dúplex, full dúplex)
- ¿Qué modo de multiplexaje se está utilizando?
- ¿Cuál es la utilización del medio? (Ayuda: No confunda bits y bytes)

Problema 2.3 ¿Por qué un cable coaxial no se trenza y uno telefónico sí?

Problema 2.4 Imagine una fibra óptica tendida a lo largo del ecuador. Su longitud sería un poco mayor a 40,000 km. Considere únicamente t_f , el retardo de propagación en la fibra (ignorando todos los retrasos de procesamiento, regeneración, etcétera). Desde un punto en el ecuador se envía una señal por la fibra y exactamente al mismo tiempo se envía una señal a un satélite geoestacionario que la devuelve a la Tierra, El retardo de ida y vuelta al satélite es t_s . ¿Qué relación hay entre t_f y t_s ?

- $t_f \approx t_s/3$
- $t_f \approx t_s/2$
- $t_f \approx 3t_s/4$
- $t_f \approx t_s$
- $t_f \approx 4t_s/3$

Problema 2.5 Establezca una relación entre los conceptos de la derecha y los de la izquierda poniendo en los casilleros de la derecha la o las claves de la izquierda que correspondan. Cada elemento de la derecha puede tener cero o más respuestas correctas.

| | | | |
|---|--|---|--|
| A | La frecuencia de la señal es de 100 MHz | Se ubica en el cinturón de Clark | |
| B | Satélite geo-estacionario | No tiene frecuencias >25 kHz | |
| C | Datagrama | Señal de 64000 bps | |
| D | Protocolo | TCP | |
| E | Sincronía | Reglas para establecer una comunicación entre capas del mismo nivel | |
| F | Portadora de una estación de AM | se requiere para transmitir voz de forma digital | |
| G | Una señal de voz | intercambio de señales para lograr una comunicación | |
| H | 36,000 km | Señal generada a partir de muestreo, cuantización, codificación | |
| I | NPDU | Parece que está fijo en el espacio | |
| J | Señalización | La velocidad de la luz | |
| K | 300,000 km/s | Unidad de datos en la capa tres del modelo de OSI | |
| L | Tasa de desplazamiento de las señales de radio | Se digitaliza a 8000 muestras/s | |
| M | Conversión A/D | El periodo es de 10nSeg | |
| N | PCM | Desplaza el espectro de la señal | |

Problema 2.6 ¿Cuántos bits "caben" en un enlace E1 (2.048 Mbps) de 300 Km? Considere una velocidad de propagación de $0.67c$.

Problema 2.7 ¿Cuál es la máxima velocidad de transmisión para un sistema que tiene un ancho de banda de 24 kHz y una relación señal a ruido de 20 dB?

Problema 2.8 Dos músicos situados en ciudades distantes quieren tener una jam session mediante una red de comunicaciones. Encuentre la máxima distancia entre los músicos si quisieran interactuar en tiempo real, entendiendo por ello la existencia de un retardo igual al que habría si estuvieran separados 10 metros. La velocidad del sonido es, aproximadamente, 330 m/s y la velocidad de propagación en la red es $2/3$ la velocidad de la luz.

10. Cuando no sea indispensable hacer la distinción de sus funciones, utilizaremos indistintamente los términos nodo, dispositivo o equipo para referirnos a los equipos intermedios de comunicaciones y equipos terminales conectados a la red ↩

11. Las señales electromagnéticas en el vacío son un caso especial que no será tratado en estas notas. ↩
12. De hecho, un símbolo puede tener menos de un bit de información, es decir, un bit puede ocupar varios símbolos de la señal portadora ↩
13. El par trenzado es un par llamado "balanceado". La señal viaja como una diferencia de potencial en un conductor con relación al otro, no a una tierra física. ↩
14. Los cables STP sólo fueron populares en las redes locales token ring desplegadas por IBM. Prácticamente han desaparecido en la actualidad. ↩
15. Más adelante veremos que hay despliegues de 40 Gbps y 100 Gbps, pero éstos todavía no son populares. ↩
16. Poco a poco los operadores van sustituyendo sus redes por fibra óptica. ↩