

# Redes y Comunicaciones de Datos I

## Resumen

October 16, 2012

## 1 Conceptos Básicos

*Telemática:* ciencia que utiliza las telecomunicaciones para potenciar las posibilidades y aplicaciones de la informática.

### 1.1 Arquitectura de Redes

**Redes de computadoras.** Conjunto de computadoras autónomas **interconectadas**.

Dos computadoras están *interconectadas* cuando pueden intercambiar información, servicios, recursos, etc. Esta interconexión puede realizarse a través de distintos medios, como ser *cables de cobre, fibra óptica, microondas, rayos infrarrojos, satélites, etc.*

**Sistemas distribuidos.** Un conjunto de computadoras independientes aparece ante sus usuarios como un sistema consistente y único.

La diferencia entre ambas está en el **software** (en el SO sobretodo), más que en el **hardware**.

### 1.2 Dispositivos utilizados para la interconexión de Redes

- *Repetidores* (regeneran la señal) y *amplificadores* (la amplifican).
- *Puentes* (Bridges).
- *Commutador o Router:* Dispositivo especializado en la conmutación de paquetes. Generalmente utiliza un hardware y software diseñados a propósito.
- *Gateway.*

### 1.3 Clasificación de las Redes

#### 1.3.1 Segundo tecnología de transmisión

**Enlaces de difusión** (*redes broadcast*). Estas redes tienen un solo canal de comunicación por lo que todas las máquinas de la red lo comparten; si una máquina envía un **paquete**, todas las demás lo reciben. Cuando las máquinas reciben un paquete verifican la dirección de destino (guardada dentro del paquete) y solo el destinatario lo procesará, los demás lo desecharán. “*La información se envía a todos los nodos de la red, aunque solo interese a unos pocos*”.

Estos sistemas soportan también el envío de paquetes con una dirección de difusión (*broadcast*) en el destinatario, en este caso todos los que reciben el paquete lo procesarán. Por último puede enviarse un paquete a un conjunto de máquinas, esto se conoce como multidifusión (*multicasting*).

Se pueden crear **redes planas**, es decir redes en las que la comunicación entre dos ordenadores cualesquiera se haga de forma directa, sin routers intermedios. Presenta posibles problemas de seguridad.

**Enlaces punto a punto.** Estas redes constan de muchas conexiones entre pares individuales de máquinas. Para ir del origen al destino, un paquete en este tipo de red podría tener que visitar primero a una o varias máquinas intermedias. El transporte de datos en estas redes se conoce como unidifusión (*unicasting*). “*La información se envía solo al nodo al cual va dirigida*”.

Generalmente la comunicación entre dos ordenadores cualesquiera se realiza a través de nodos intermedios que **encaminan** o **commutan** los paquetes. En un enlace punto a punto, el conjunto de router o comutadores y los enlaces que los unen forman lo que se conoce como **subred**.

Además, permite crear topologías complejas (*anillo, malla, estrella, etc*).

Los enlaces pueden ser:

- + **Simplex:** transmisión en un solo sentido.
- + **Half-duplex:** transmisión en ambos sentidos, pero no a la vez.
- + **Full-duplex:** transmisión simultánea en ambos sentidos.

En el caso de *full-duplex* y *half-duplex* el enlace puede ser simétrico -misma velocidad en ambos sentidos- o asimétrico. Normalmente, los primeros son simétricos.

*Nota:* Las redes de poca cobertura geográfica tienden a utilizar la *difusión*, mientras que las de cobertura más grande usan la *punto a punto*.

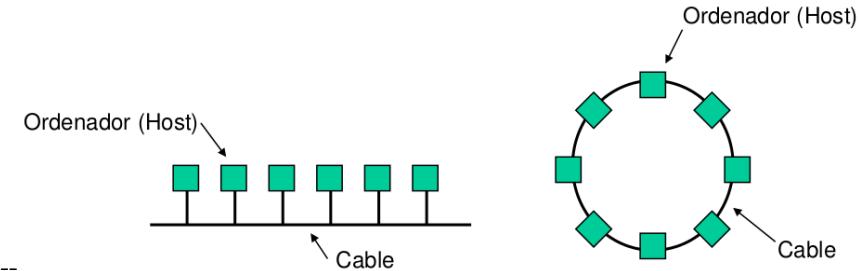


Figure 1: Topologías LAN típicas, izquierda **bus** (*ethernet*) y derecha **anillo** (*token ring*).

### 1.3.2 Segundo su cobertura geográfica

**PAN** ( $\approx 1$  metro). Destinadas a una sola persona.

*Ejemplo:* una red que conecta los distintos dispositivos de una computadora.

**LAN** ( $\leq 1$  km). Redes privadas cuyo ámbito no sobrepasa un edificio o campus. Se caracterizan por su alcance, tecnología de transmisión (generalmente *broadcast*), y topología. Están diseñadas desde el principio para transportar datos. El cableado es propiedad del usuario normalmente.

*Ejemplos:* ethernet, token ring, redes inalámbricas por radio.

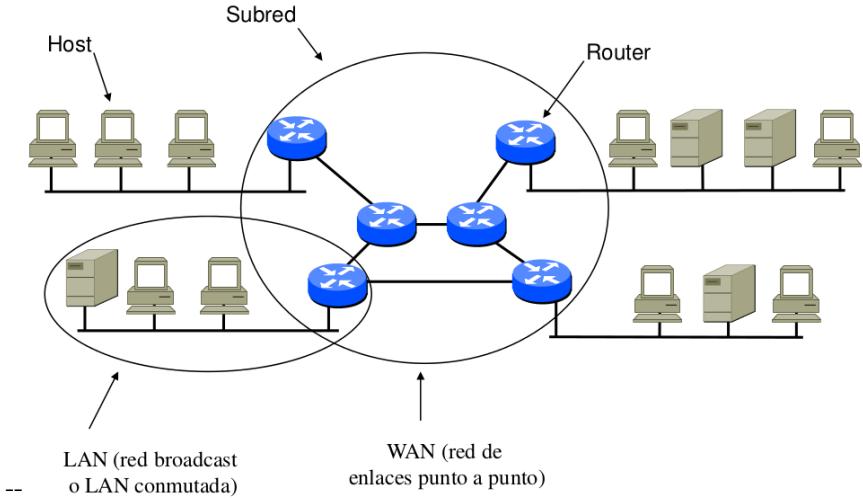
**MAN** ( $\leq 10$  km). Abarca una ciudad.

*Ejemplo:* Red de televisión por cable disponible en muchas ciudades.

**WAN** ( $\leq 1000$  km). Tienen velocidades de transferencia de datos menores a las LANs. Utilizan la base del sistema telefónico, diseñado inicialmente para transportar voz. Son servicios contratados generalmente a operadoras. Suelen utilizar enlaces **punto a punto temporales** o **permanentes**, salvo las comunicaciones vía satélite que son *broadcast*. Tienen un costo elevado, por lo que se suele optimizar su diseño.

## 2 Software de Redes

La interconexión de computadoras es un problema técnico de complejidad elevada y la mejor forma de resolver un problema complejo es dividirlo en partes. En telemática dichas partes se llaman **capas**,



**Figure 2:** Escenario típico de una red completa.

que tienen funciones bien definidas, y están construidas una encima de la otra. El propósito de cada capa es ofrecer ciertos servicios a las capas superiores, a las cuales no se le muestran los detalles de implementación de los servicios ofrecidos.

## 2.1 Modelo de Capas

Actualmente todas las *arquitecturas de red* se describen utilizando un **modelo de capas**, que permite describir el funcionamiento de las redes de forma modular y hacer cambios de manera sencilla.

### 2.1.1 Conceptos básicos

**Servicio.** Conjunto de primitivas (**operaciones**) que una capa proporciona a la capa que está sobre ella. Este define qué operaciones puede realizar la capa en beneficio de sus usuarios, pero no dice nada respecto a su implementación. Se relaciona con la interfaz.

**Protocolo.** Conjunto de reglas que rigen el formato y significado de los paquetes que intercambian las entidades iguales de máquinas diferentes.

Normalmente todo protocolo requiere el envío de algunos mensajes especiales o información de control adicional a la que se transmite. Generalmente esto se hace añadiendo una **cabecera** (*a veces también una cola*) al paquete a transmitir.

La información de control reduce el caudal útil: supone un **overhead** (*ejemplo: si tengo un overhead del 20%, y tengo que transmitir 100 bytes, en realidad transmito 120 bytes*). Como cada capa añade su propia información de control, también añade entonces más *overhead*.

**Interfaz.** Define qué operaciones y servicios primitivos pone la capa más baja a disposición de la capa superior inmediata. Si están bien definidas, simplifican el reemplazo de la implementación de una capa por otra implementación totalmente diferente, siempre que se mantengan exactamente los mismos servicios ofrecidos a la capa superior en ambas implementaciones.

Los datos no se transfieren de manera directa de la capa  $n$  de una máquina a la capa  $n$  de la otra máquina, sino que cada capa pasa los datos y la información de control a la capa inmediatamente inferior, hasta alcanzar la capa más bajo. Debajo de la **capa 1** se encuentra el **medio físico** a través del cual ocurre la comunicación real.

Un conjunto de capas y protocolos se conoce como **arquitectura de red**. Ni los detalles de la implementación ni las especificaciones de las interfaces son parte de esta, ya que están ocultas en el interior de la máquina. La lista de protocolos utilizados por un sistema, un protocolo por capa, se conoce como **pila de protocolos**.

### 2.1.2 Objetivos Fundamentales

- **Sencillez:** Hace abordable el complejo problema de la comunicación entre ordenadores.
- **Modularidad:** Permite realizar cambios relativamente fáciles a alguna de sus partes sin afectar al resto.
- **Compatibilidad:** La comunicación entre dos entidades de una capa puede realizarse independientemente de las demás.

### 2.1.3 Principios

- La capa  $n$  ofrece sus servicios a la capa  $n + 1$ .
- La capa  $n + 1$  solo usa los servicios de la capa  $n$ .
- La capa  $n$  solo habla con la capa  $n$  de otro sistema (*peer to peer*, ó comunicación igual a igual) siguiendo el protocolo de la capa  $n$ .

### 2.1.4 Servicios Orientados a la Conexión y No Orientados a la Conexión

Las capas pueden ofrecer estos dos tipos de servicios a las capas que están sobre ellas.

**Orientado a Conexión.** Se concibió en base al sistema telefónico: el usuario del servicio primero establece una conexión, la utiliza, y luego la abandona.

*Características:* Se respeta el orden de los paquetes. Se mantiene la misma ruta o camino para todos los paquetes. Si el canal se corta la comunicación se interrumpe.

*Ejemplos:* red telefónica conmutada, ATM, frame relay.

**No Orientado a Conexión.** Se concibió en base al sistema postal: cada mensaje lleva completa la dirección de destino y cada uno se enruta a través del sistema, independientemente de los demás.

*Características:* No se respeta el orden de los paquetes. La ruta puede variar para cada paquete. La red es más robusta ya que si una ruta queda inservible, pueden usarse otras. Si la comunicación no es posible los datos se pierden.

*Ejemplos:* IP, ethernet.

### 2.1.5 Quality of Service (QoS)

Consiste en fijar unos valores límites para un conjunto de parámetros (*ancho de banda, latencia, disponibilidad, etc*), asegurando así que la red no se va a congestionar. Se puede ver como una especie de “contrato” cliente-proveedor.

En un servicio **confiable** el receptor confirma la recepción de cada mensaje para que el emisor este seguro de que llegó. Como consecuencia de esto hay sobrecargas y retardos que con frecuencia son valiosos pero a veces indeseables. Es por ello que dependiendo de la aplicación, se opta por un servicio *confiable* o no, aunque a veces no está disponible el primero.

## 2.2 Modelo OSI

### 2.2.1 Principios

- Una capa se debe crear donde se necesite una abstracción bien definida.
- Cada capa debe realizar una función bien definida.
- La función de cada capa se debe elegir con la intención de definir protocolos estandarizados internacionalmente.

- Los límites de las capas se deben elegir a fin de minimizar el flujo de información a través de las interfaces.
- La cantidad de capas debe ser suficientemente grande para no tener que agrupar funciones distintas en la misma capa y lo bastante pequeña para que la arquitectura no se vuelva inmanejable.

### 2.2.2 Capas del OSI

**Aplicación:** Ofrece a las aplicaciones la posibilidad de acceder a los servicios de las demás capas y define los protocolos que utilizan las aplicaciones para intercambiar datos. El usuario normalmente no interactúa directamente con el nivel de aplicación. Suele interactuar con programas que a su vez interactúan con el nivel de aplicación pero ocultando la complejidad subyacente.

**Presentación:** Encargada de la sintaxis de los datos. Convierte los datos de la red a los datos requeridos por la aplicación.

**Sesión:** Sincroniza el intercambio de datos entre capas inferiores y superiores.

**Transporte:** Esta capa se encarga de que los datos enviados y recibidos lleguen en orden, sin duplicar y sin errores. Puede ser orientado o no a la conexión.

**Red:** Se encarga de enlazar con la red y encaminar los datos hacia sus lugares o direcciones de destino. Brinda la información de hacia dónde debo ir. Esta y las dos capas inferiores se encargan de todo el proceso externo al propio sistema y que están tanto en terminales como en enlaces o repetidores.

**Enlace de datos:** Se encarga de que los datos se envíen con seguridad a su destino y libre de errores. Cuando la conexión no es punto a punto, esta capa no puede asegurar su cometido sino la capa superior. Tiene el control de la capa física.

**Física:** Transmite los datos y suministra servicios a la siguiente capa. Para ello debe conocer las características mecánicas, eléctricas, funcionales y de procedimiento de las líneas.

### 2.3 Modelo TCP/IP e Híbrido

Los protocolos **TCP/IP** nacieron por la necesidad de inter-operar redes diversas (*inter-networking*). Se diseñó después de los protocolos, por eso a diferencia del *modelo OSI* este tiene protocolos “pre-definidos”. No funciona con otra pila de protocolos.

Cuando se usa un modelo siguiendo el OSI en las capas bajas y el TCP/IP en las altas, se dice que se utiliza un modelo **híbrido**.

La descomposición del problema de la comunicación en capas es similar que en el OSI. El problema de OSI es que en una capa, todos los protocolos deben tener un funcionamiento similar además de utilizar las funciones definidas en la capa inferior y de suministrar funciones a la capa superior.

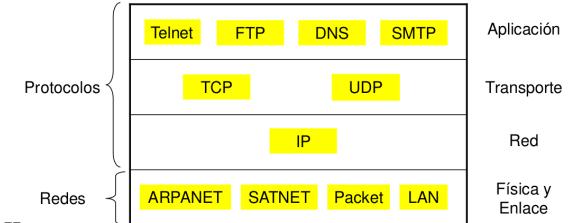
#### 2.3.1 Capas de TCP/IP

**Aplicación:** proporciona comunicación entre procesos o aplicaciones en computadores distintos.

**Transporte:** encargada de transferir datos entre computadores sin detalles de red pero con mecanismos de seguridad.

**Internet:** se encarga de dirigir y guiar los datos desde el origen al destino a través de la red o redes intermedias.

**Host-Red:** acceso al Medio, asimilable a la capa 2 (enlace de datos) y a la capa 1 (física) del modelo OSI.



**Figure 3:** Protocolos y redes del modelo TCP/IP inicial.

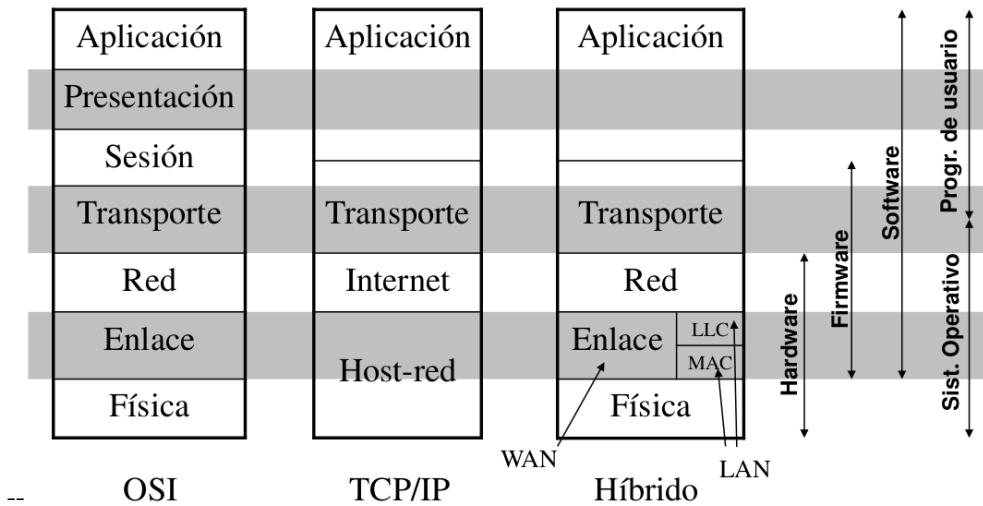


Figure 4: Comparación de los distintos modelos.

### 2.3.2 Diferencias entre OSI y TCP/IP

- En OSI primero fue el modelo, después los protocolos. En TCP/IP primero los protocolos, después el modelo.
- En OSI el modelo es bueno, los protocolos malos; en TCP/IP al revés.
- En OSI los productos llegaban tarde, eran caros y tenían muchas fallas; en TCP/IP todo lo contrario.
- En TCP/IP los productos aparecían rápido, estaban muy probados (pues los usaba mucha gente), y a menudo eran gratis.
- OSI soporta comunicación orientada y no orientada a la conexión en la capa de red, pero solo orientada en la capa de transporte; TCP/IP usa un modo no orientado en la capa de red y ambos en la capa de transporte.

### 2.3.3 OSI modificado

El que vamos a utilizar. Sus capas son:

- **Aplicación** (incluye *sesión* y *presentación*).
- **Transporte.**
- **Red.**
- **Enlace de datos.**
  - + Subcapa LLC (*Logical Link Control*).
  - + Subcapa MAC (*Media Access Control*).
- **Física.**

## 3 Transmisión de Datos

### 3.1 Conceptos Básicos

- **Dato:** Paquete que vamos a transmitir. Cualquier entidad capaz de transportar información.

- + **Analógico:** Datos que pueden tomar valores en un intervalo de tiempo continuo (*ejemplos*: voz, video, temperatura).
- + **Digital:** Datos que toman valores discretos (*ejemplos*: cadenas de texto, números enteros).
- **Señales:** Representaciones eléctricas o electromagnéticas de los datos.
  - + **Analógicas:** Onda electromagnética que varía continuamente y que según sea su espectro puede propagarse a través de una serie de medios.
  - + **Digitales:** Secuencia de pulsos de tensión que pueden transmitirse a través de un medio conductor. Es más económica que la analógica y menos susceptible al ruido, pero sufre más atenuación.
- **Señalización:** Hecho de propagación física de las señales a través de un medio adecuado.
- **Transmisión:** Comunicación de datos mediante la propagación y procesamiento de señales.
  - + **Analógica:** es una forma de transmitir señales analógicas con independencia de su contenido; las señales pueden representar datos analógicos o datos digitales.
  - + **Digital:** es dependiente de su contenido. Se puede transmitir a una distancia limitada.

## 3.2 Transmisión

### 3.2.1 Perturbaciones

**Atenuación.** La energía de la señal decae con la distancia por lo que tenemos que asegurarnos que la señal llegue con suficiente energía como para ser captada por la circuitería del receptor, y además el ruido debe ser menor que la señal original. Debido a que la atenuación varía con la frecuencia las señales analógicas llegan distorsionadas por lo que hay que utilizar un sistema que le devuelva sus características iniciales.

**Distorsión de retardo.** Fenómeno debido a que la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado varía con la frecuencia.

**Ruido.** La señal original resulta modificada debido a distorsiones introducidas por el sistema de transmisión. Es una señal que se inserta entre el emisor y receptor de una señal dada. Hay diferentes tipos de ruido:

- + **Ruido térmico:** Ruido que está siempre presente y en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión. Es función de la temperatura. Cantidad de ruido termina en un ancho de banda de 1 Hz es:  $N_0 = KT$  [W/Hz], donde  $K = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$ .
- + **Ruido de intermodulación:** Aparecen por un mal funcionamiento del sistema o uso excesivo de energía en la señal. Es un ruido **correlacionado** -existe cuando la señal está presente-.
- + **Diaphonía:** Acoplamiento no deseado de dos o más señales.
- + **Ruido impulsivo:** Son pulsos o picos regulares de corta duración y amplitud relativamente grande.

### 3.2.2 Ventajas de la Transmisión Digital

**Tecnología Digital:** más barata y disminuye el tamaño de circuitería.

**Integridad de los datos:** el uso de *repetidores* hace que el ruido y otros efectos no se acumulen. La regeneración de señales mejora el SNR.

**Utilización de la capacidad:** se puede utilizar multiplexación -división en tiempo- de forma más sencilla y de forma más económica.

**Seguridad y Privacidad:** los datos transportados se pueden encriptar.

**Integración:** se procesan tanto datos digitales como analógicos de la misma forma.

	<b>Señal analógica</b>	<b>Señal digital</b>
Datos analógicos	Dos alternativas (1) la señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos; (2) los datos analógicos se codifican ocupando una porción distinta del espectro	Los datos analógicos se codifican utilizando un codec para generar una cadena de bits.
Datos digitales	Los datos digitales se codifican usando un modem para generar señales analógicas	Dos alternativas (1) la señal consiste en dos niveles de tensión que representan dos valores binarios (2) los datos digitales se codifican para producir una señal digital con las propiedades deseadas.
	<b>Transmisión analógica</b>	<b>Transmisión digital</b>
Señal analógica	Se propaga a través de amplificadores; se trata de igual manera si la señal se usa para representar datos analógicos o digitales	Se supone que la señal analógica representa datos digitales. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, los datos digitales se obtienen de la señal de entrada y se usan para regenerar una nueva señal analógica de salida
Señal digital	No se usa	La señal digital representa una cadena de unos o ceros, los cuales pueden representar datos digitales o pueden ser resultado de la codificación de datos analógicos.

**Figure 5:** Cuadros comparativos de la transmisión analógica-digital.

### 3.2.3 Desventajas de la Transmisión Digital

- Transmitir señales analógicas por transmisión digital requiere el uso de mayor ancho de banda, según el teorema de muestreo el doble de frecuencia.
- Las señales analógicas antes de transmitirse deben transformarse en digitales y luego de nuevo en analógicas antes de ser entregada al emisor. Doble conversión.
- Requiere sincronización precisa: cuando tengo una cadena de bits de 1 o 0 tengo que determinar cuántos son los bits de esa cadena.
- En cualquier caso una señal cuando se transmite irá atenuándose con la distancia. Para evitarlo el sistema de transmisión analógica incluye *amplificadores* que inyectan energía, pero introducen ruido. El sistema de transmisión digital, es diferente ya que depende del contenido de la señal y solo puede transmitir en una distancia limitada. Estos incluyen *repetidores*, reciben la señal digital, regeneran el patrón de bits y los retransmite.

*Nota:* si una señal analógica transporta datos digitales se usa repetidores en vez de amplificadores.

### 3.3 Relación señal/ruido SNR

Es la relación que utilizamos para saber cuánto ruido tenemos en nuestra señal de interés. Normalmente la expresamos en dB (*decibeles*). Son valores de **potencia**, pero también pueden ser representados como valores de tensión o de corriente. **MAYOR** es el **SNR**, **MEJOR** es nuestro sistema de comunicación.

### 3.4 Factor de ruido

Es la relación que existe entre la entrada y la salida de un equipo amplificador: para las señales **analógicas**, cuando pasa por un **amplificador** el ruido aumenta.

$$F_{\text{ruido}} = \frac{\text{SNR}(\text{entrada})}{\text{SNR}(\text{salida})}, \quad \text{con } F_{\text{ruido}} \geq 1.$$

### 3.5 Capacidad del Canal

Es la velocidad máxima que se pueden transmitir los datos en un canal de comunicación bajo unos condiciones dadas.

Hay cuatro conceptos en juego relacionados entre sí, que son:

- **Velocidad de transmisión:** velocidad, expresada en *bits por segundo* (bps), a la que se pueden transmitir los datos.
- **El ancho de banda** estará limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión; se mide en hercios o ciclos por segundo.
- **El ruido:** nivel medio de ruido a través del camino de transmisión.
- **Tasa de errores:** tasa a la que ocurren los errores. Se considera que ocurrió un error cuando se recibe un 1 habiendo transmitido un 0 o viceversa.

#### 3.5.1 Ancho de Banda de Nysquit

Nysquit demostró que dado un ancho de banda  $B$ , la mayor velocidad de transmisión de la señal que se puede conseguir es  $2B$ , y viceversa. Si las señales a transmitir son binarias, la velocidad de transmisión que se puede conseguir con  $B$  Hz es igual a  $2B$  bps.

Si tenemos el caso de señales multinivel, la formulación de Nysquit para el cálculo de la capacidad de canal es:  $C = 2B \log_2 M$ , en bps.

Esto es considerando que no hay ruido.

#### 3.5.2 Fórmula para la capacidad de Shannon

Dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es la tasa de errores. Shannon demostró que los canales son ruidosos, por lo tanto, encontró una ecuación que relaciona la SNR con la cantidad de niveles de modulación:  $M_{\text{máx}} = \sqrt{1 + \text{SNR}}$ .

Una conclusión de Shannon es que la capacidad **máxima** del canal *libre de errores*, en bits por segundo, verifica la ecuación:

$$C = 2B \log_2(M_{\text{máx}}) = B \log_2(1 + \text{SNR}).$$

Cuanto mayor sea el ancho de banda, más ruido se introducirá en el sistema: cuando  $B$  aumenta, SNR disminuye.

## 4 Medios de transmisión

Es el camino físico entre el transmisor y el receptor. Este medio puede ser:

**Guiado:** las ondas electromagnéticas se transmiten a través de un medio sólido (*tangible*). Las limitaciones en la transmisión están impuestas por el medio.

**No guiado:** la transmisión inalámbrica se realiza a través de la atmósfera (*intangible*). Las características de la transmisión están más determinadas por el ancho de banda de la señal emitida por la antena que el propio medio.

Hay una serie de factores relaciones con el medio de transmisión y con la señal que determinan tanto la distancia como la velocidad de transmisión:

- **El ancho de banda:** al aumentar, la velocidad de transmisión puede incrementar.
- **Dificultades en la transmisión:** limitan la distancia (*ejemplo:* atenuación).
- **Interferencias:** pueden distorsionar o destruir la señal.
- **Número de receptores:** en enlaces compartidos, cada uno de los conectores puede atenuar y distorsionar la señal.

### 4.1 Medios Guiados

La capacidad de transmisión depende drásticamente de la distancia y de si el medio guiado es punto a punto o multipunto.

	Rango de frecuencias	Atenuación típica	Retardo típico	Separación entre repetidores
Par trenzado (con carga)	0 para 3,5 kHz	0,2 dB/km @ 1 kHz	50 $\mu$ s/km	2 km
Pares trenzados (múltiples cables)	0 para 1 MHz	3 dB/km @ 1 kHz	5 $\mu$ s/km	2 km
Cable coaxial	0 para 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 $\mu$ s/km	1 para 9 km
Fibra óptica	180 para 370 THz	0,2 para 0,5 dB/km	5 $\mu$ s/km	40 km

Figure 6: Características de transmisión de medios guiados punto-a-punto.

#### 4.1.1 Par trenzado

- Aislado independientemente
- Trenzado conjuntamente
- A veces “embutido” en un cable
- Normalmente se instala en los edificios en construcción



Figure 7: Características del par trenzado.

Es el medio de transmisión más usado, el más viejo, el más económico, y el más sencillo de manejar; pero el más limitado en velocidad y distancia máxima. Si la distancia es muy larga, se usan haces (envolturas) que pueden contener cientos de pares (denominados cables multi-pares).

Tiene una fuerte dependencia a la atenuación con la frecuencia. Sirve para transmitir señales tanto analógicas como digitales.

Consiste en dos alambres de cobre aislados de 0.5[mm] a 1[mm] de espesor. Estos alambres se trenzan en forma helicoidal para evitar la interferencia entre pares (*diafonía*). Existe diafonía en un par trenzado cuando puede medirse una señal que pertenece a otro par cercano.

Dos parámetros que se miden en par trenzado son el NEXT (*near end crosstalk*), y el FEXT (*far end crosstalk*).

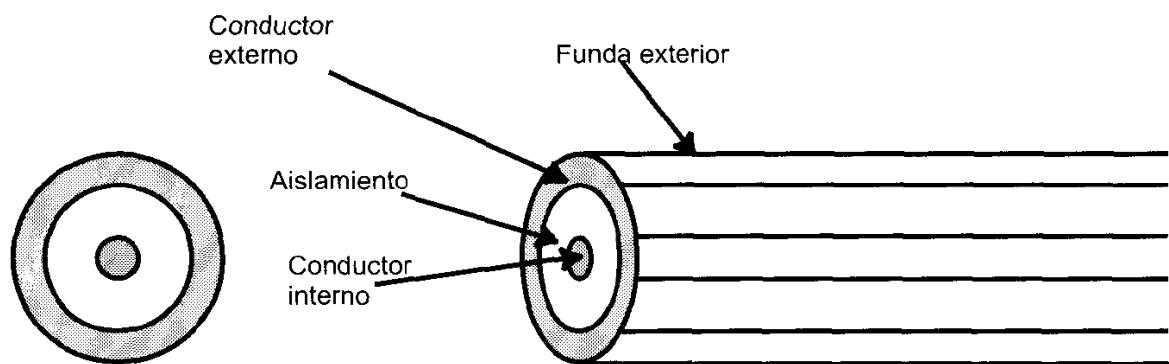
Hay dos variantes de pares trenzados:

**No apantallado** (UTP, *unshielded twisted pair*): es el menos caro. Es fácil de instalar y de manipular.

**Apantallado**: más difícil y costoso de manipular, pero proporciona mejores prestaciones a altas velocidades de transmisión.

*Aplicaciones*: Redes de telefonía, redes de comunicación en edificios o campus.

#### 4.1.2 Cable Coaxial



- El conductor externo forma una malla de protección
- El conductor interno es un metal sólido
- Separados por material aislante
- Cubiertos por material de relleno

**Figure 8:** Características del Cable Coaxial.

#### Características:

- + Transmite tanto señales analógicas como digitales.
- + Buena respuesta en frecuencia, permitiendo mayores frecuencias y velocidades de transmisión.
- + Por construcción, es menos susceptible a interferencia como a diafonía.

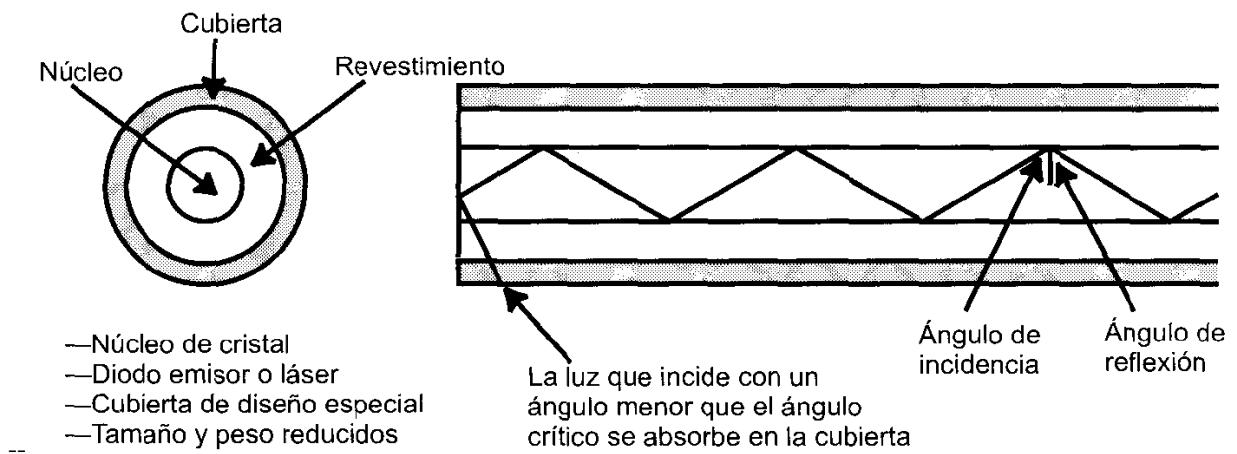
#### Limitaciones:

- + Atenuación.
- + Ruido de intermodulación y térmico.

*Aplicaciones*: distribución de televisión, telefonía a larga distancia, enlaces en computadoras a corta distancia, LAN.

#### 4.1.3 Fibra Óptica

Es un medio flexible y delgado, compuesto por una delgada hebra de vidrio o silicio fundido, capaz de confinar un haz de naturaleza óptica.

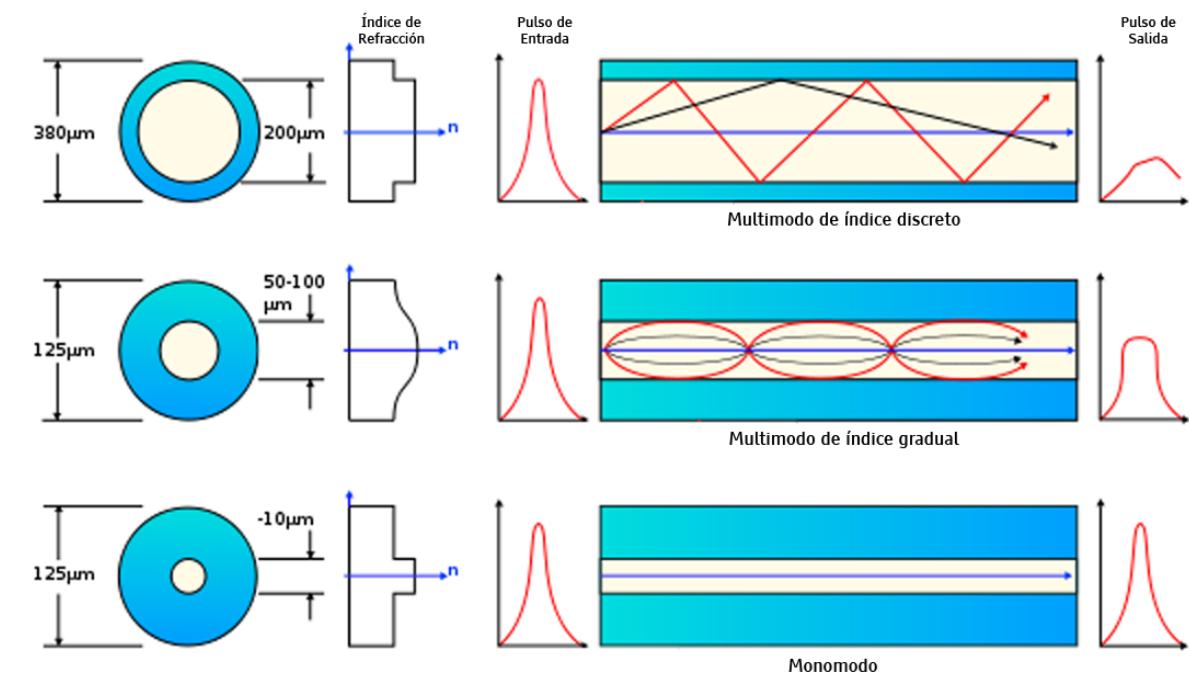


**Figure 9:** Características de la Fibra Óptica.

Hay tres componentes clave por cada filamento: la **fuente de luz** (LED o Láser), el **medio transmisor** (la fibra óptica), y el **detector de luz** (fotodiodo).

#### Características:

- + **Mayor Capacidad:** se ha demostrado que se pueden conseguir velocidades de transmisión de cientos Gbps para decenas de kilómetros de distancia.
- + **Menor tamaño y peso.**
- + **Atenuación menor.** Además, es constante a lo largo de un gran intervalo.
- + **Aislamiento electromagnético:** no se ven afectados por estos campos. No son vulnerables a interferencias, ruido impulsivo, o diafonía. A la vez, sus hebras no irradian energía  $\Rightarrow$  no producen interferencias significativas.
- + **Mayor separación entre repetidores:** menor costo, y menores fuentes de error.



**Figure 10:** Modos de transmisión en la Fibra Óptica.

*Aplicaciones:* transmisiones a larga distancia y metropolitanas, acceso a áreas rurales, bucles de abonado,

LAN.

### Modos de transmisión:

**Multimodo.** Su núcleo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido a su gran tamaño, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión. Pero la necesidad de separar los pulsos de luz limita la velocidad de transmisión.

Dependiendo el tipo de índice de refracción, tenemos dos tipos:

- **Índice escalonado:** El núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica, con alta dispersión modal.
- **Índice gradual:** El índice de refracción no es constante, tiene menor dispersión modal y el núcleo se constituye de distintos materiales.

**Monomodo.** es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un pequeño tamaño (8.3 a 10 micrones) que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra. Esto le permite alcanzar grandes distancias (hasta 400[Km] como máximo, mediante un láser de alta intensidad) y transmitir elevadas tasas de información (decenas de Gbps).

### Pérdida en los cables

A la pérdida de potencia a través del medio se conoce como atenuación, es expresada en decibelios, con un valor positivo en dB, y es causada por distintos motivos, como la disminución en el ancho de banda del sistema, velocidad, eficiencia. La fibra *multimodal*, tiene mayor pérdida debido a que la onda luminosa se dispersa por las impurezas. Las principales causas de pérdida en el medio son:

- + **Pérdidas por absorción:** Ocurre cuando las impurezas en la fibra absorben la luz, y esta se convierte en energía calorífica; las pérdidas normales van de 1 a 1000 dB/Km.
- + **Pérdida de Rayleigh:** En el momento de la manufactura de la fibra, existe un momento donde no es líquida ni sólida y la tensión aplicada durante el enfriamiento puede provocar microscópicas irregularidades que se quedan permanentemente; cuando los rayos de luz pasan por la fibra, estos se difractan haciendo que la luz vaya en diferentes direcciones.
- + **Pérdidas por radiación:** Estas pérdidas se presentan cuando la fibra sufre de dobleces, esto puede ocurrir en la instalación y variación en la trayectoria, cuando se presenta discontinuidad en el medio.
- + **Pérdidas por acoplamiento:** Las pérdidas por acoplamiento se dan cuando existen uniones de fibra, se deben a problemas de alineamiento.
- + **Dispersión modal:** Es la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz, debido a que siguen rutas distintas.
- + **Dispersión cromática:** Esta dispersión sólo se observa en las fibras tipo monomodal, ocurre cuando los rayos de luz emitidos por la fuente que se propagan por el medio, no llegan al extremo opuesto en el mismo tiempo; esto se puede solucionar cambiando el emisor fuente.

### Reflexión y refracción

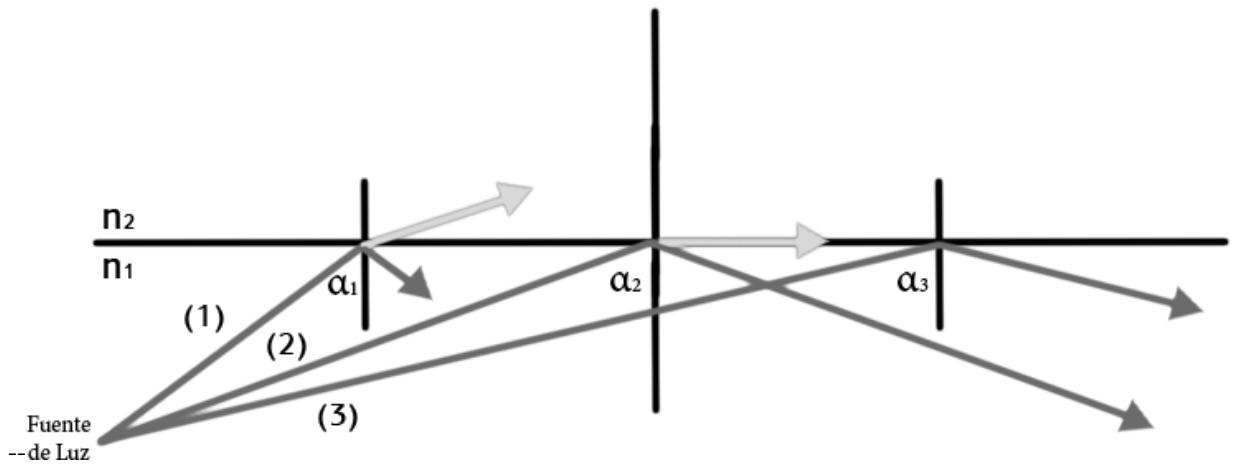
Los principios básicos de su funcionamiento se justifican aplicando las *leyes de la óptica geométrica*, principalmente, la **ley de la refracción** (principio de reflexión interna total) y la **ley de Snell**.

Su funcionamiento se basa en transmitir por el núcleo de la fibra un haz de luz, tal que este no atraviese el revestimiento, sino que se refleje y se siga propagando. Esto se consigue si el **índice de refracción** del núcleo es mayor al índice de refracción del revestimiento, y también si el **ángulo de incidencia** es superior al **ángulo crítico**.

En la figura 11 podemos ver los distintos casos de rayos incidentes, y cuando se produce la **reflexión total interna**. La **Ley de Snell** establece que:

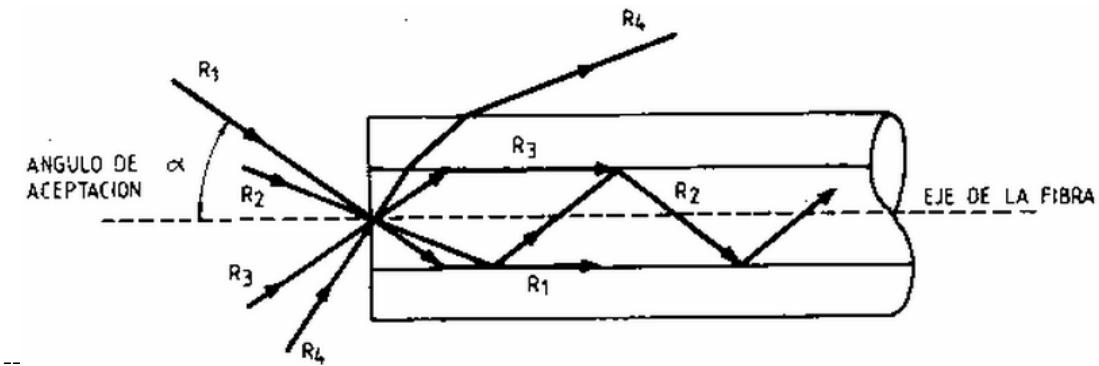
$$n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta).$$

### Ángulo de aceptación



**Figure 11:** (1) La luz incidente a cualquier ángulo menor que el ángulo crítico ( $\alpha_1 < \alpha_{\text{crítico}}$ ) no se refleja totalmente. Parte de la energía del rayo incidente se refracta; (2) El rayo incidente al emergir lo hace a lo largo de la superficie de separación de los dos medios ( $\alpha_2 = \alpha_{\text{crítico}}$ ); (3) Ocurre reflexión total interna ( $\alpha_3 > \alpha_{\text{crítico}}$ ), toda la energía del rayo permanece dentro del ámbito de  $n_1$ .

Es el máximo ángulo en el cual los rayos de luz externos pueden chocar con la interfaz revestimiento-fibra y aun propagarse por la fibra con una respuesta no mayor a 10dB de máximo valor. Si giramos el ángulo  $\theta_{\text{in}}$  de aceptación alrededor del eje de la fibra, describe el **cono de aceptación** de entrada.



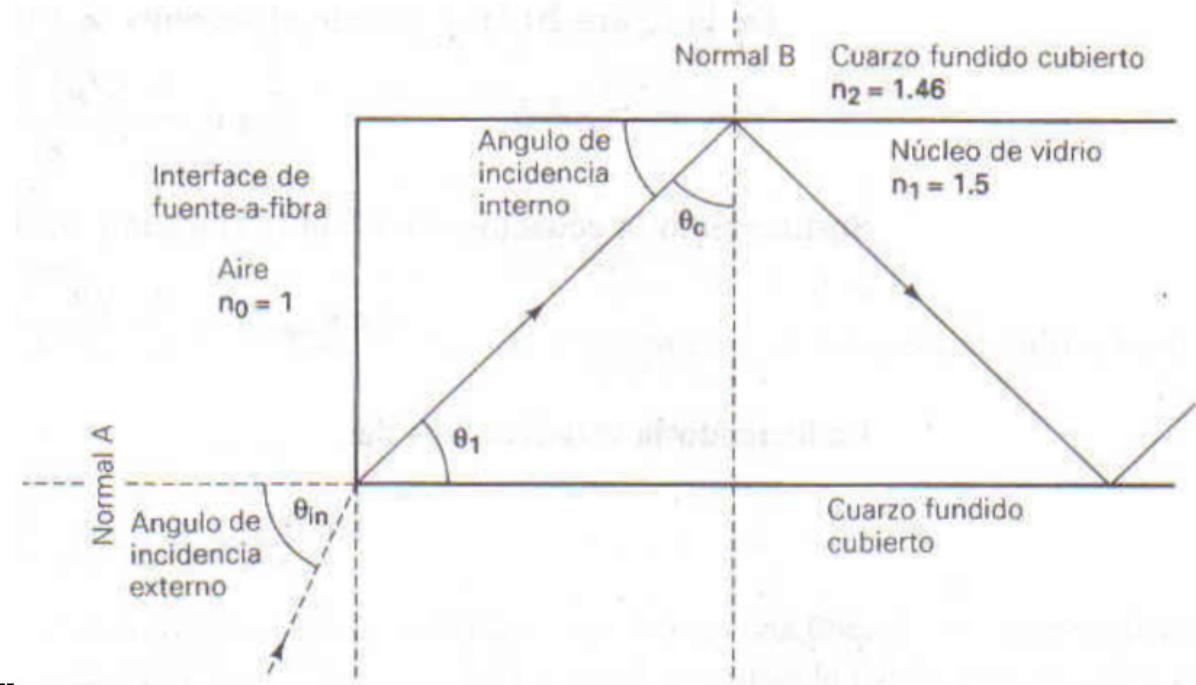
**Figure 12:** Sección lateral de una fibra óptica. Todos los rayos incidentes entre  $R_1$  y  $R_3$  (dentro del ángulo máximo de aceptación) se propagarán por la fibra.

### Cálculo del ángulo de aceptación

Cuando los rayos de luz entran en la fibra, chocan con la interfaz de aire/vidrio, en la normal  $A$ . En consecuencia, la luz que entra en la interfaz de aire vidrio/vidrio se propaga de un medio menos denso a un medio más denso. Esto causa, de acuerdo a la *ley de Snell*, que los rayos de luz cambien de dirección y se propaguen diagonalmente por el núcleo a un ángulo  $\theta_c$  que es diferente al ángulo de incidencia externo  $\theta_{\text{in}}$ . Para que un rayo pueda propagarse por un cable, debe chocar a la interfaz de núcleo/cubierta interna a un ángulo que sea mayor que el ángulo crítico  $\theta_c$ .

Aplicando la *ley de Snell* a  $\theta_{\text{in}}$ :

$$\begin{aligned} n_0 \sin(\theta_{\text{in}}) &= n_1 \sin(\theta_1), & \theta_1 &= 90 - \theta_c, \\ \sin(\theta_1) &= \sin(90 - \theta_c) = \cos(\theta_c), \\ \Rightarrow n_0 \sin(\theta_{\text{in}}) &= n_1 \cos(\theta_c). \end{aligned}$$



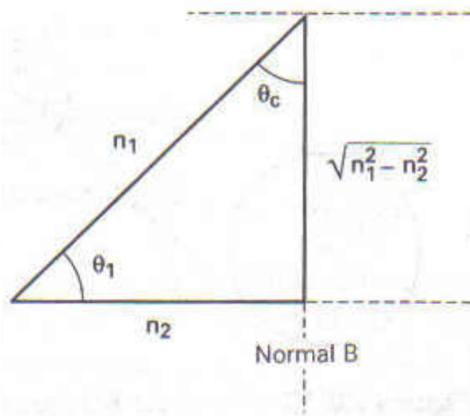
**Figure 13:** Propagación del rayo adentro y abajo de un cable de fibra óptica.

Rearreglando, y usando el teorema de pitágoras (ver figura 14):

$$\begin{aligned} \sin(\theta_{in}) \frac{n_1}{n_0} &= \cos(\theta_c), \\ \cos(\theta_c) &= \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}, \\ \sin(\theta_{in}) &= \frac{n_1}{n_0} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}, \\ \sin(\theta_{in}) &= \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}. \end{aligned}$$

Dado a que los rayos de luz generalmente entran a la fibra por un medio de aire,  $n_0 = 1$ . Entonces, la ecuación final sería:

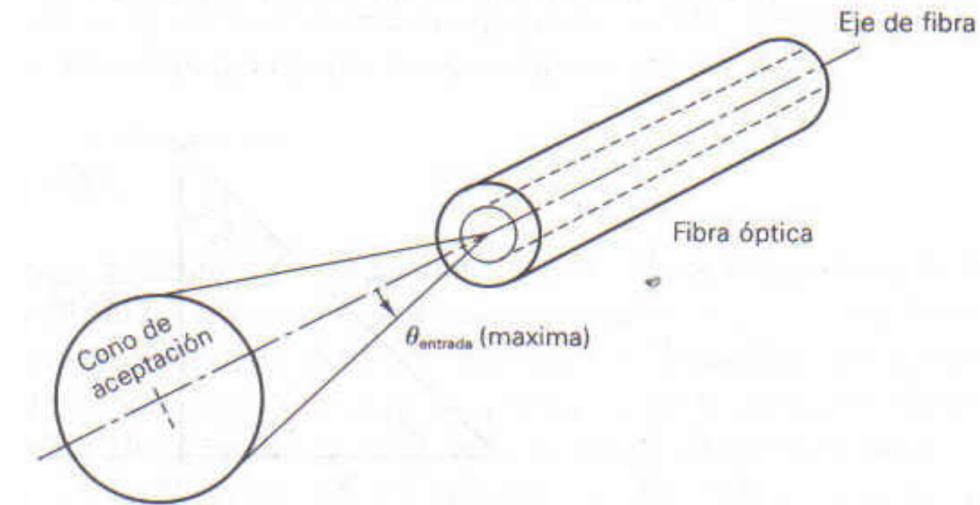
$$\theta_{in\text{ (máxima)}} = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



**Figure 14:** Relación geométrica en la fibra óptica.

### Apertura numérica (NA)

Describe la habilidad de recojer la luz de una fibra óptica. Entre más grande la magnitud de NA, mayor es la cantidad de luz aceptada por la fibra de la fuente de luz externa. Para una fibra de índice discreto, la NA se define matemáticamente como:  $NA = \sin(\theta_{in})$ .



**Figure 15:** Cono de aceptación de una cable de fibra óptica.

## 5 Técnicas para la codificación de señales

### 5.1 Conceptos Básicos

- **Señal portadora:** señal continua de frecuencia constante.
- **Señal en banda base:** es la señal de entrada que puede ser tanto analógica como digital.
- **Modulación:** proceso de codificación de los datos generados por la fuente en la señal portadora de frecuencia  $f_c$ . Las técnicas de modulación se basan en la modificación de uno o más parámetros fundamentales: **amplitud, frecuencia, fase**.
- **Velocidad de modulación:** velocidad a la que cambia el nivel de la señal, medida en *baudios* (elemento de señal por segundo).

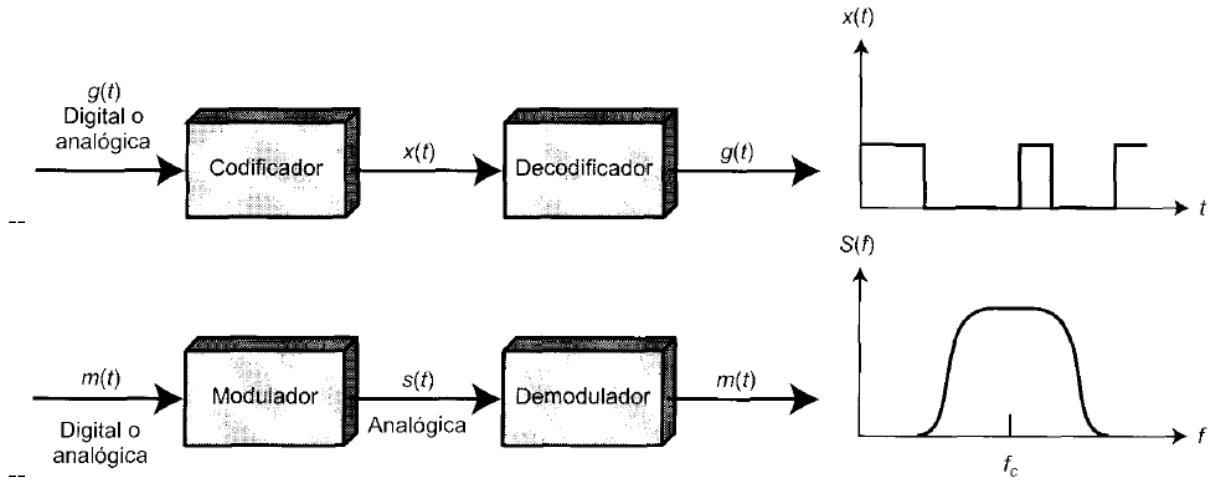


Figure 16: Codificación sobre una señal digital (*arriba*); modulación sobre una señal analógica (*abajo*).

### 5.2 Datos Digitales, Señales Digitales

#### 5.2.1 Conceptos Básicos

- **Duración de un bit:** es el tiempo empleado en el transmisor para emitir un bit, definido por  $1/R$ , con  $R$  siendo la velocidad de transmisión.
- **Señal unipolar:** si todos los elementos tienen el mismo signo algebraico.
- **Señal polar:** si un estado lógico se representa con un nivel positivo de tensión, y el otro mediante un nivel negativo.
- **Señal bipolar:** un estado lógico se representa con un valor nulo de tensión y el otro estado lógico se representa en forma alternada por valores de tensión positivos y negativos.
- **Retorno a cero:** técnica que se puede aplicar a señales polares, unipolares y bipolares; a mitad del intervalo, el valor cae a cero.

El receptor debe conocer o determinar la duración de cada bit, y determinar si el nivel de cada bit es alto (0) o bajo(1). Los factores que determinan el éxito o fracaso del receptor al interpretar la señal son:

- Un incremento en la **velocidad de transmisión** aumentará la *tasa de errores por bit* (BER).
- Un aumento en la relación **SNR** reduce el BER.
- Un incremento del **ancho de banda** permite un aumento de la **velocidad de transmisión**.
- Mejorar el **esquema de codificación** mejora las prestaciones del sistema.

A continuación se consideran los factores a tener en cuenta para la evaluación y comparación de los distintos esquemas de codificación:

**Espectro de la señal:** la ausencia de componentes a altas frecuencias significa que se necesita menos ancho de banda para su transmisión. Si la señal tiene continua, para su transmisión se requiere la existencia de una conexión **física** directa. En la práctica, es frecuente que la función de transferencia del canal se deteriore en las proximidades de los límites de banda. Por tanto, un buen diseño debería concentrar la potencia transmitida en la parte central del ancho de banda de la señal transmitida.

**Sincronización:** una solución costosa es usar una señal de reloj externa. Otra alternativa es proporcionar la sincronización mediante la propia señal transmitida.

**Detección de errores:** la detección está al nivel de la capa de **enlace de datos**, pero es útil hacerlo también en la capa **física**.

**Inmunidad al ruido e interferencia:** algunos códigos exhiben un comportamiento superior que otros en presencia de ruido.

**Coste y complejidad:** cuanto mayor es la **velocidad de modulación**, para una velocidad de transmisión dada, mayor es el **coste**. Algunas técnicas usan velocidades de modulación mayores a la velocidad de transmisión de datos reales.

### 5.2.2 Definición de los formatos para la codificación de señales digitales

#### 1. No retorno a nivel cero (NRZ-L):

0 = nivel alto.

1 = nivel bajo.

#### 2. No retorno a nivel cero invertido (NRZI):

0 = no hay señal.

1 = transición al comienzo del intervalo.

#### 3. Bipolar-AMI:

0 = no hay señal.

1 = nivel positivo o negativo, alterna-

nante.

#### 4. Pseudoternaria:

0 = nivel positivo o negativo, alter-

nante.

1 = no hay señal.

#### 5. Manchester:

0 = transición de alto-bajo en mitad del intervalo.

1 = transición de bajo-alto en mitad del intervalo.

#### 6. Manchester Diferencial:

Siempre hay una transición en mitad del intervalo.

0 = transición al principio del intervalo.

1 = no hay transición al principio del intervalo.

#### 7. B8ZS:

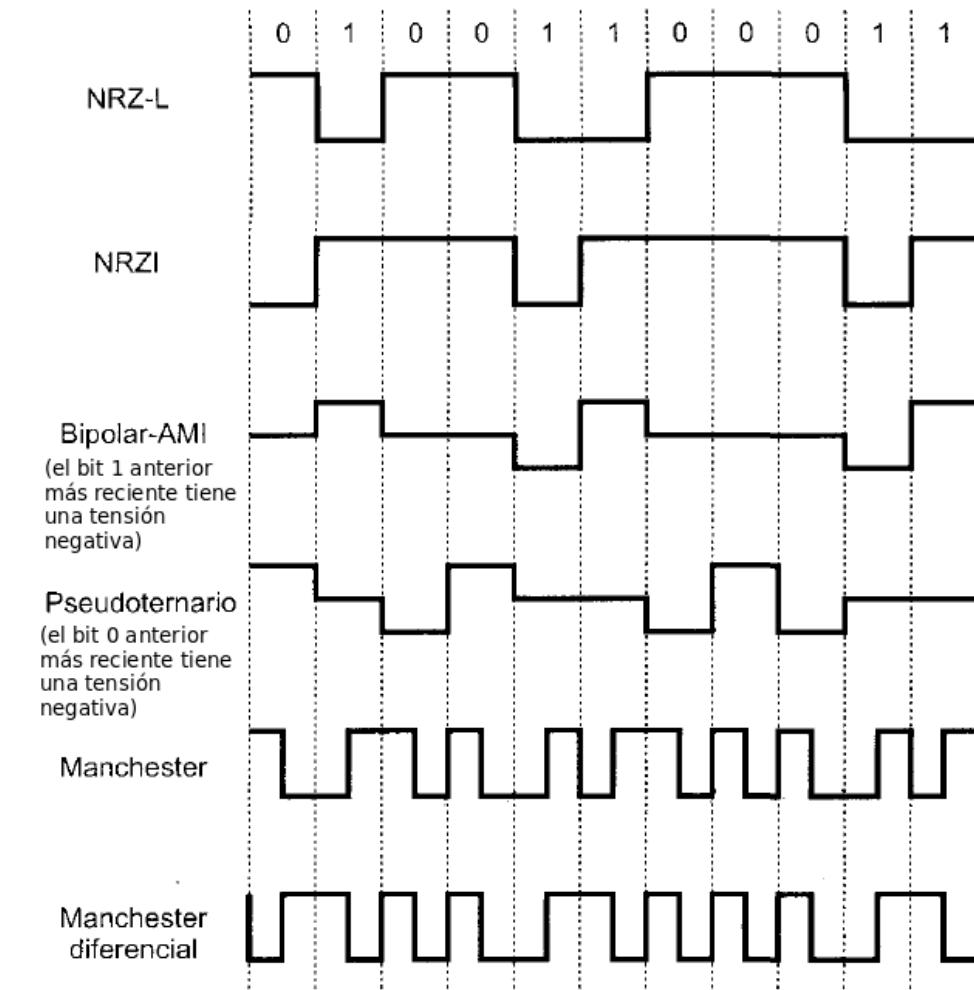
Igual que el bipolar-AMI, excepto que cualquier cadena de ocho ceros se reemplaza por una cadena que tiene dos violaciones de código.

#### 8. HDB3:

Igual que el bipolar-AMI, excepto que cualquier cadena de cuatro ceros se reemplaza por una cadena que contiene una violación de código.

### 5.2.3 No Retorno a Cero

La más simple técnica sería usar un nivel de tensión positivo para representar un 1, y una ausencia de tensión para representar un 0. Las codificaciones NRZ son las más fáciles de implementar, y además hacen un uso eficaz del ancho de banda. Su principal limitación es la presencia de una componente continua y la ausencia de capacidad de sincronización. Dos codificaciones dentro de esta categoría son:



**Figure 17:** Formatos de codificación de algunas señales digitales.

**NRZ-L (nonreturn to zero-level):** usa un nivel negativo para representar un valor binario y una tensión positiva para representar otro. No hay transiciones.

**NRZI (nonreturn to zero-level, invert ones):** un 1 se codifica mediante la transición al principio del intervalo de señalización, mientras que un 0 se representa por la ausencia de transmisión. Una ventaja es que en presencia de ruido es más seguro detectar una transición. Otra ventaja es que se mantiene robusta ante inversiones de polaridad.

#### 5.2.4 Binario Multinivel

Usan más de dos niveles de señal.

**Bipolar-AMI:** el 0 binario se representa por ausencia de señal, y el 1 binario se representa como un pulso positivo o negativo, de forma alterna.

**Pseudoternarios:** como el *bipolar-AMI*, pero invertido: los ceros son los que se alternan.

Estos tipos de esquemas proporcionan una serie de **ventajas**:

- Evitan problemas de **sincronización** en el caso de que haya una cadena larga de unos o ceros (dependiendo de cual se alterna);
- además, estos últimos no tienen componente de tensión continua, debido a la alternación;
- el ancho de banda es mucho menor al correspondiente al NRZ;

- y proporcionan una forma sencilla de detectar errores: cualquier error aislado que elimine/inserte un pulso no cumplirá esta propiedad.

Y una serie de **desventajas**:

- Problemas de sincronización para cadenas largas de la componente continua.
- La BER para los códigos NRZ es significativamente menor.
- La señal puede tomar tres posibles valores, por lo que se necesitan más bits para representar la información.
- Para obtener la misma probabilidad de error que una NRZ, necesita aproximadamente 3dB más de potencia.

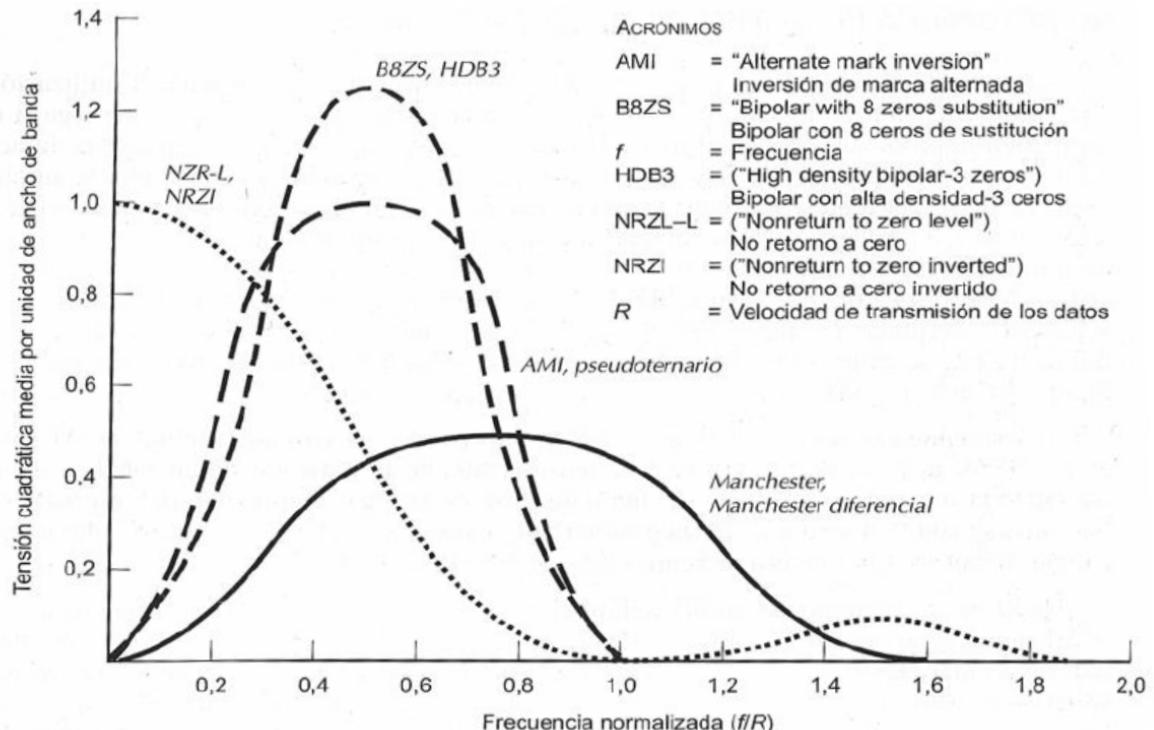


Figure 18: Densidad espectral de varios esquemas de codificación.

### 5.2.5 Bifase

Todas las técnicas bifase fuerzan una transición en mitad del intervalo de duración del bit. De esa forma, sirve como procedimiento de sincronización.

**Manchester:** una transición bajo-alto representa un 1 binario, alto-bajo un 0 binario.

**Manchester diferencial:** la transición se utiliza tan sólo para proporcionar sincronización. La codificación de un 0 se representa por la presencia de una transición al principio del intervalo del bit, y un 1 se representa mediante la ausencia de una transición al principio del intervalo.

La velocidad de modulación máxima es el doble que en los códigos NRZ; eso significa que el ancho de banda necesario es por tanto mayor. Sin embargo, tienen las siguientes **ventajas**:

- **Sincronización:** la transición que ocurre durante el intervalo de duración de un bit siempre está presente y el receptor puede sincronizar usando dicha transición.
- **No tienen componente en continua.**
- **Detección de errores:** si se descubre ausencia de transición.

### 5.2.6 Velocidad de Modulación

La **velocidad de transmisión** es  $1/T_B$ , donde  $T_B$  = duración de un bit. La **velocidad de modulación** es la velocidad a la que se generan los elementos de la señal. En general,

$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M},$$

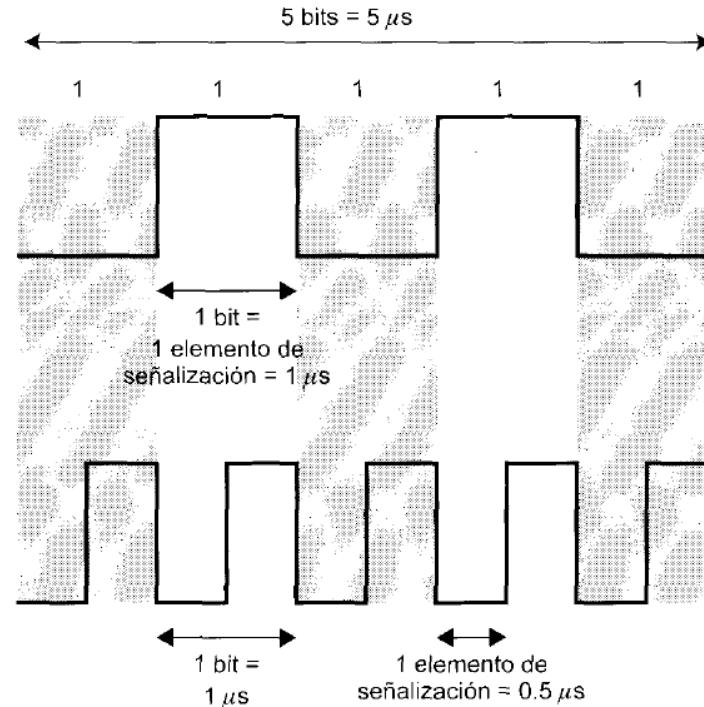
donde:

$D$  = velocidad de modulación en baudios.

$R$  = velocidad de transmisión en bits.

$L$  = número de bits por elemento de señal.

$M$  = número de elementos de señalización diferentes =  $2^L$ .



**Figure 19:** Una cadena de unos a 1 Mbps. *Arriba*, un **NRZI** (velocidad de modulación de  $1/T_B$ ); *abajo*, codificación **Manchester** (aquí, la velocidad de modulación es  $2/T_B$ ).

### 5.2.7 Técnicas de Aleatorización

Estas técnicas reemplazan las secuencias de bits que den lugar a niveles de tensión constante por otras secuencias que tengan suficiente número de transiciones, de tal manera que el reloj del receptor pueda mantenerse sincronizado. En el receptor se debe identificar la secuencia reemplazada y sustituirla por la secuencia original. Están basadas en la codificación **bipolar-AMI**.

Tienen como **objetivos**:

- Evitar la componente continua.
- Evitar las secuencias largas que correspondan a niveles de tensión nula.
- No reducir la velocidad de transmisión de los datos.
- Tener capacidad de detectar errores.

Los dos esquemas de codificación más usuales son:

**B8ZS** (*Bipolar with 8-Zeros Substitution*): que se realiza según la siguiente regla:

+ Si en la cadena hay un octeto de ceros, y el último valor de tensión anterior a dicho octeto fue:

- a) **Positivo**  $\Rightarrow$  se codifica 000 + -0 - +.
- b) **Negativo**  $\Rightarrow$  se codifica 000 - +0 + -.

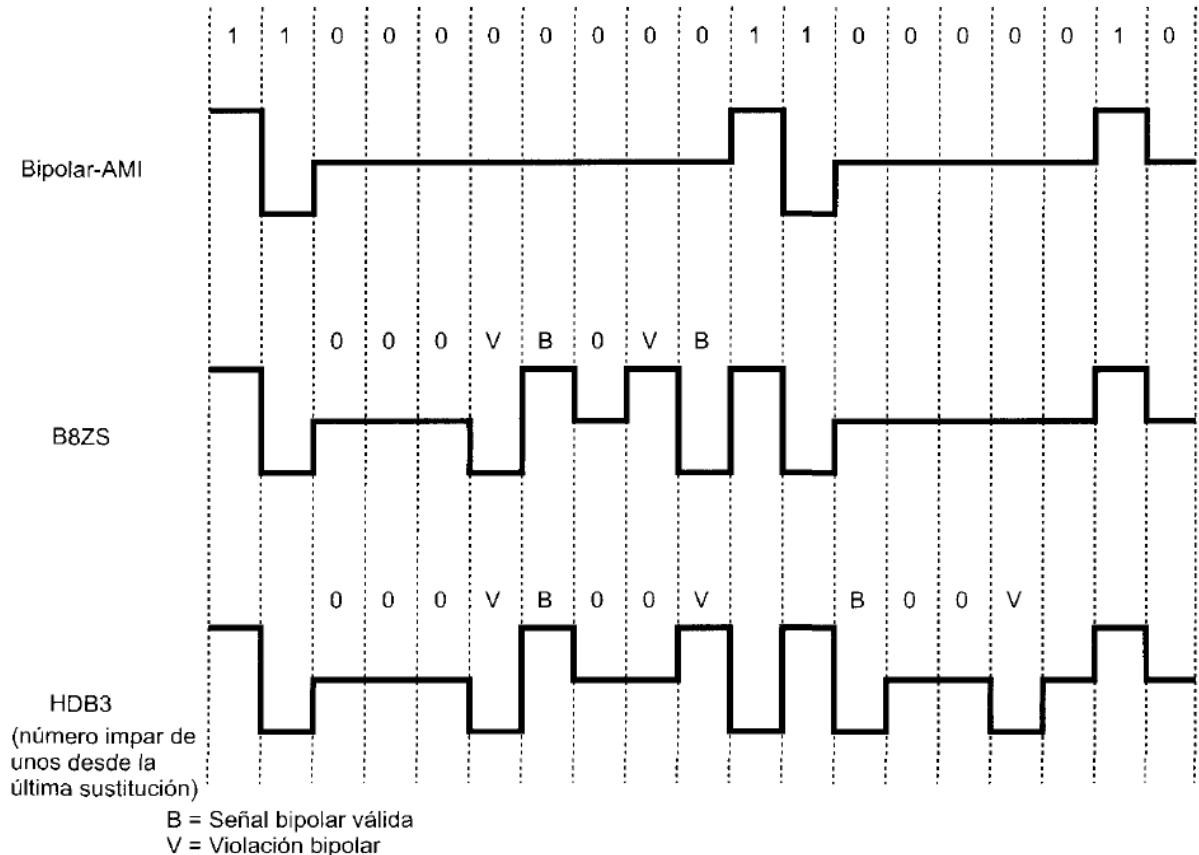
Con este procedimiento se fuerzan dos *violaciones de código*, que son improbables de haber sido causadas por ruido. Por tanto, el receptor identificará dicho patrón y lo interpretará convenientemente como un octeto de ceros.

**HDB3** (*High Density Bipolar-3 zeros*): sustituye cadenas de cuatro ceros por otras con uno o dos pulsos, y al cuarto cero le asigna una *violación de código*. Considera una regla adicional (ver **figura 20**) para asegurar que los mismos tengan una polaridad alternante, evitando así la componente continua.

		<b>Números de pulsos bipolares desde la última sustitución</b>	
Polaridad del pulso anterior		Impar	Par
-		000-	+00+
+		000+	-00-

**Figure 20:** Reglas de sustitución en HDB3.

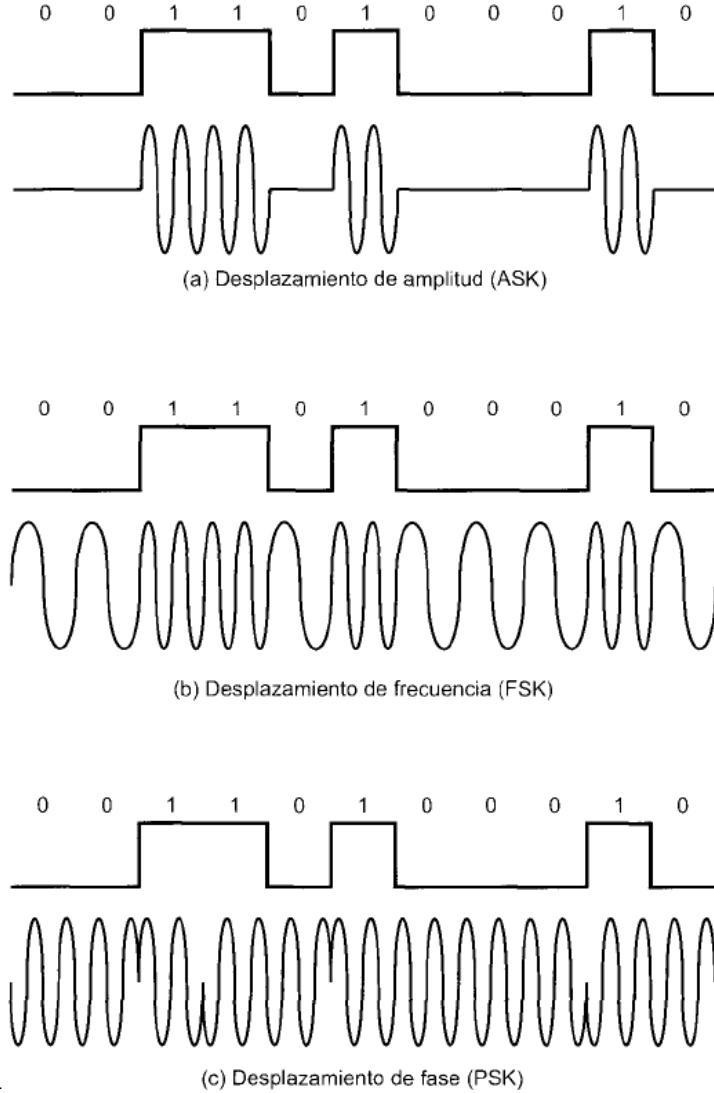
Estos códigos son adecuados para la transmisión a altas velocidades.



**Figure 21:** Reglas de codificación para B8ZS y HDB3.

### 5.3 Datos Digitales, Señales Analógicas

La situación más habitual de transmisión de datos digitales como señales analógicas es a través de la red telefónica. Aunque no es apta para la transmisión de señales digitales, se pueden conectar dispositivos digitales a través de la red mediante el *módem* (modulador-demodulador), el cual convierte los datos digitales en señales analógicas, y viceversa.



**Figure 22:** Modulación de datos digitales usando señales analógicas.

#### 5.3.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud

En ASK (*Amplitude-Shift Keying*), los dos valores binarios se representan mediante dos amplitudes diferentes de la portadora. Es usual que una de las amplitudes sea cero. La señal transmitida por cada intervalo correspondiente a la duración de un bit es:

$$\text{ASK} \quad s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & 1 \text{ binario}, \\ 0 & 0 \text{ binario}. \end{cases}$$

Es sensible a cambios repentinos de ganancia, y es bastante ineficaz. Se usa para la transmisión de datos digitales en fibras ópticas.

### 5.3.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia

El esquema FSK (*Frequency-Shift Keying*) más habitual es el binario BFSK. En este caso, los dos valores binarios se representan mediante dos frecuencias diferentes, próximas a la frecuencia de la portadora.

$$\text{BFSK} \quad s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & 1 \text{ binario}, \\ A \cos(2\pi f_2 t) & 0 \text{ binario}. \end{cases}$$

donde  $f_1$  y  $f_2$  corresponden a desplazamiento de la frecuencia portadora  $f_c$ , de igual magnitud, pero en sentidos opuestos.

El BFSK es menos sensible a errores que ASK. Se usa en transmisiones de radio de alta frecuencia.

Una señal más eficaz en el uso del ancho de banda, pero también más susceptible a errores, es la **FSK múltiple** (MFSK), en la que se usan más de dos frecuencias. En este caso, cada elemento de señalización representará más de un bit. Se define como:

$$\text{MFSK} \quad s(t) = A \cos(2\pi f_i t), \quad 1 \leq i \leq M$$

donde:

$$f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d.$$

$f_c$  = la frecuencia de la portadora.

$f_d$  = la diferencia de frecuencias.

$L$  = número de bits por elemento de señal.

$M$  = número de elementos de señalización diferentes =  $2^L$ .

### 5.3.3 Modulación por Desplazamiento de Fase

En el esquema PSK (*Phase-Shift Keying*), la fase de la señal portadora se desplaza para representar los datos digitales.

#### PSK de dos niveles:

El más simple es el PSK binario, que utiliza dos fases para representar los dígitos binarios.

$$\text{BPSK} \quad s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & 1 \text{ binario}, \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & 0 \text{ binario}. \end{cases}$$

Una alternativa al BPSK es el **PSK diferencial** (DPSK, *Differential PSK*). En este esquema, un 0 binario se representa enviando un elemento de señal con la misma fase que el elemento anterior transmitido, y un 1 binario con la fase invertida respecto al anterior elemento transmitido. El desplazamiento de fase es entonces relativo a la fase correspondiente al último símbolo transmitido, en lugar de ser relativo a algún valor constante de referencia.

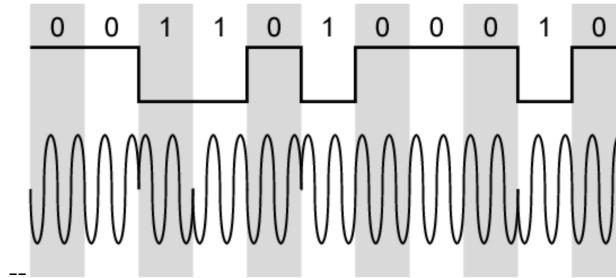


Figure 23: El PSK diferencial.

#### PSK de cuatro niveles:

La técnica QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) considera desplazamientos múltiples de  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ). Gracias a esto, representamos dos bits en lugar de uno.

### 5.3.4 Modulación de Amplitud en Cuadratura

La técnica QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) es usado en *ADSL* y en algunas técnicas *wireless*. Es una combinación de ASK y PSK. En QAM se aprovecha el hecho de que es posible enviar simultáneamente dos señales diferentes sobre la misma frecuencia portadora, utilizando dos réplicas de la misma, desplazadas entre si  $90^\circ$ . Cada señal portadora se modula usando ASK. Las dos señales independientes se transmiten sobre el mismo medio. Matemáticamente:

$$\text{QAM} \quad s(t) = d_1(t) \cos(2\pi f_c t) + d_2(t) \sin(2\pi f_c t),$$

donde  $d_1$  y  $d_2$  son dos secuencias separadas de una señal de entrada binaria  $d(t)$ .

(extraído de *Wikipedia inglés*) Un **diagrama de constelación** es una representación de una señal modulada por un esquema digital de modulación tal como el QAM. Muestra a la señal en un diagrama de dispersión en el plano complejo a instantes de elementos de señal. Representa, de forma abstracta, los posibles elementos de señal que pueden ser seleccionados por un cierto esquema de modulación como puntos en el plano complejo.

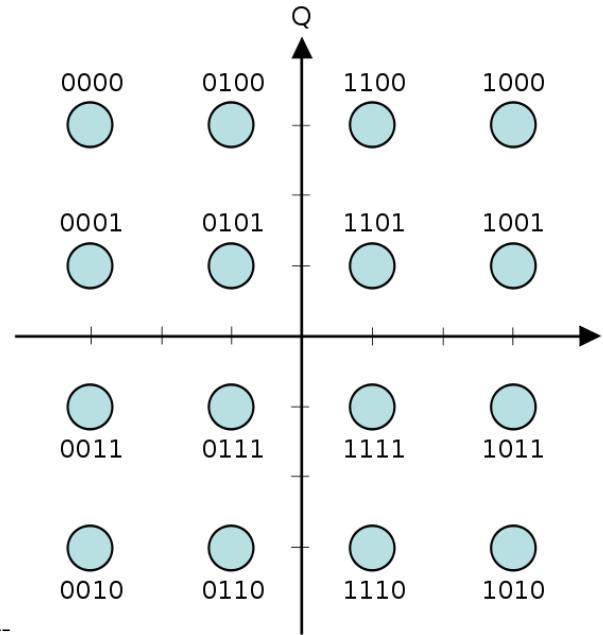


Figure 24: Un diagrama de constelación para un QAM-16 rectangular.

## 5.4 Datos Analógicos, Señales Digitales

El **codec** es el dispositivo que se utiliza para la conversión de los datos analógicos en digitales y que, posteriormente, recupera los datos analógicos iniciales a partir de los digitales. Una de las técnicas más importantes usadas en el *codec* es la modulación por pulsos. Dentro de esta categoría tenemos:

**PWM (Pulse Width Modulation)**: Cierto valor de amplitud determina, cuando toma la muestra, que ancho va a tener un pulso determinado.

**PPM (Pulse Position Modulation)**: Dependiendo de donde pongo el pulso en el espacio, va ser el valor de amplitud que tenga la señal.

**PAM (Pulse Amplitud Modulation)**: Un valor de amplitud ancho, genera un pulso alto, y uno negativo, uno más pequeño. Sufre mucho el ruido.

**PCM (Pulse Code Modulation)**: Codifica de acuerdo al dato que obtengo.

Obtenemos de esa forma las ventajas (y desventajas) de la **transmisión digital**.

### 5.4.1 Pulse Code Modulation

Se basa en el siguiente teorema:

**Teorema de muestreo:** Si una señal  $f(t)$  se muestrea a intervalos regulares de tiempo con una frecuencia mayor que el doble de la frecuencia más alta de la señal original, las muestras así obtenidas contienen toda la información de la señal original. La función  $f(t)$  se puede reconstruir a partir de estas muestras mediante la utilización de un filtro paso bajo.

#### Características:

- Se utiliza en sistemas de transmisión digital.
- Son pulsos de longitud fija y amplitud fija.
- Se usa un sistema binario.

El procedimiento consiste en 3 pasos:

1. **Muestreo:** Respetando el teorema, tomamos muestras *analógicas* llamadas muestras PAM.
2. **Cuantización:** Permite aproximar la muestra a uno de los niveles de escala designada. Al cuantizar la señal analógica, pierdo información y por lo tanto pierdo el valor real de la señal. Decimos entonces que se introduce un error de cuantización de la señal, dado por:

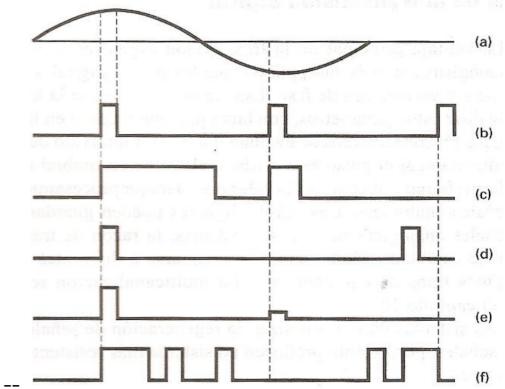
$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \log 2^n + 1.76 \text{ dB} = 6.02n + 1.76 \text{ dB}.$$

De aquí, que cada bit adicional que se use aumentará la SNR en 6dB.

3. **Codificación:** Para convertir las muestras PAM a digital, a cada una de ellas se les debe asignar un código binario. Si las muestras son de  $n$  bits, habrá  $2^n$  niveles de cuantización posibles.

Hasta acá obtuvimos una señal digital que consiste en boques de  $n$  bits donde cada uno corresponde a la amplitud de un impulso PCM.

*Ejemplo:* Sabiendo que los datos de voz se limitan a frecuencias por debajo de los 4000hz, supongamos que tenemos una señal de voz. Usando muestras de 8 bits, permite  $2^8 = 256$  niveles de cuantización, esto implica que para una única señal de voz se necesitan 8000hz, o lo que es lo mismo,  $8000 \text{ muestras} \times 8 \text{ bits} = 64 \text{ kbps}$ .



**Figure 25:** Modulación de pulsos: (a) señal analógica; (b) pulso de muestreo; (c) PWM; (d) PPM; (e) PAM; (f) PCM.

# Redes y Comunicaciones de Datos I

## Resumen II

Cristian Escudero  
basado en el resumen de Fernando Nellmедин

23 de enero de 2013

## 1. Transmisión Inalámbrica

Se van a considerar tres intervalos de frecuencias, con sus respectivas aplicaciones:

30 MHz a 1 GHz	<b>Ondas de radio</b>	Omnidireccionales
1 GHz hasta 40 GHz	<b>Frecuencias microondas</b>	Enlaces punto a punto Comunicaciones satelitales
$3 \times 10^{11}$ Hz a $2 \times 10^{14}$ Hz	<b>Zona infrarroja</b>	Conexiones locales

### 1.1. Antenas

Conductor eléctrico o conjunto de conductores utilizado para radiar o captar energía electromagnética. Convierte la energía eléctrica del transmisor en energía electromagnética, y la radia al entorno. Para recibir una señal, el procedimiento es el inverso.

Se puede usar la misma antena para una comunicación bidireccional (recibir/transmitir), con la misma eficacia.

En general una antena radiará potencia en todas las direcciones, pero normalmente no lo hará igual de bien, por lo que se suele caracterizar las antenas por su *diagrama de radiación*.

**Antena isotrópica:** caso ideal, radia potencia de igual forma en todas las direcciones (*omnidireccional*).

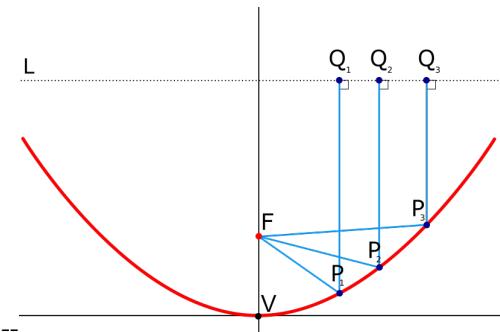
#### 1.1.1. La antena parabólica de reflexión

**Parábola:** lugar geométrico de todos los puntos que equidistan de una línea recta dada (*generatriz*) y de un punto fijo (*foco*) que no pertenecen a la recta.

Las superficies *paraboloides* (parábola de revolución) se usan en las antenas ya que verifica la siguiente propiedad: las ondas reflejadas en una parábola y que provengan de cualquier fuente de energía electromagnética que esté situada en su foco seguirán trayectorias paralelas al eje de la parábola.

En la práctica hay dispersión debido a que la fuente de energía no se ubica en un punto. Cuanto mayor sea el diámetro de la antena, más direccional será el haz. En el receptor, si las ondas recibidas son paralelas al eje de la parábola reflectante, la señal resultante estará en concentrada en el foco.

Se utiliza en aplicaciones microondas terrestres y satélites.



**Figura 1:** Sección transversal de una antena parabólica mostrando la reflexión. L es la generatriz, y F el foco.

### 1.1.2. Ganancia de una antena

Es una medida de su **direccionalidad** (no de potencia), medida en decibelios. Dada una dirección, se define la ganancia como la potencia de salida en esa dirección, comparada con la potencia transmitida en cualquier dirección por una antena isotrópica. El incremento de potencia radiada en una dirección dada se consigue a expensas de la potencia radiada en otras direcciones.

El **área efectiva** de una antena está relacionada con su tamaño físico y con su geometría, y está dada por:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f^2 A_e}{c^2},$$

donde  $G$  es la ganancia,  $A_e$  el área efectiva,  $\lambda$  la longitud de la portadora,  $f$  la frecuencia de la portadora y  $c$  la velocidad de la luz.

## 1.2. Microondas terrestres

Antena parabólica tipo «plato», típicamente de 3 metros de diámetro. Se fija rígidamente de forma tal que el haz debe estar perfectamente enfocado siguiendo la trayectoria visual hacia la antena receptora. Se sitúan a alta distancia para disminuir obstáculos en la transmisión, y se interconectan entre varias para alcanzar grandes distancias.

Se usan como alternativas a los métodos de transmisión guiados. Es frecuente su uso en TV y telefonía.

### 1.2.1. Características de transmisión

Cubre la banda de frecuencias de las microondas. Cuanto mayor sea la frecuencia utilizada, mayor es el ancho de banda potencial, y por tanto, mayor es la posible velocidad de transmisión.

La principal causa de pérdidas es la atenuación:

$$L = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \text{ dB},$$

donde  $d$  es la distancia. Al variar al cuadrado (y no exponencialmente, como en los medios guiados), la distancia entre repetidores/amplificadores puede ser mayor. La atenuación aumenta con la lluvia (especialmente, en frecuencias  $> 10$  GHz) y con las interferencias, por lo que por esto último se regula la asignación de bandas de forma estricta:

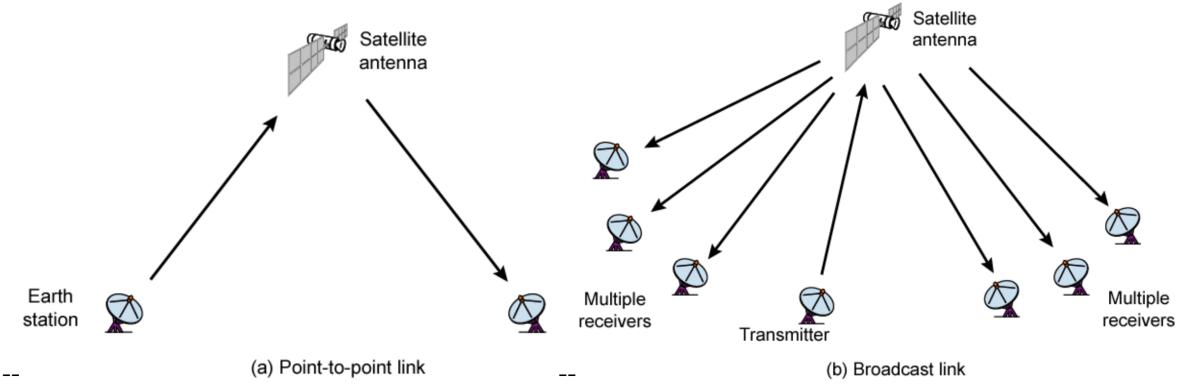
Larga distancia	4 GHz a 6 GHz
TV por cable	$\approx 12$ GHz
Punto a punto entre edificios cercanos	$\approx 22$ GHz

## 1.3. Microondas por satélite

**Satélite de comunicaciones:** estación que retransmite microondas. Enlaza dos o más receptores/transmisores terrestres, denominados estaciones base. Recibe una señal en una banda de frecuencia (canal *ascendente*), la amplifica/repite, y la retransmite en otra banda de frecuencia (canal *descendente*). Las bandas de frecuencias se denominan **canales transpondedores**. Para mantenerse constantemente alineado con las estaciones base, el satélite debe estar en una órbita geoestacionaria (35.863 km).

Sus aplicaciones principales están en la difusión de televisión, telefonía a larga distancia y redes privadas.

El rango de frecuencias óptimo va de 1 a 10 GHz. Por debajo de 1 GHz, el ruido producido por causas naturales e interferencias con otros dispositivos electrónicos es apreciable. Por encima de los 10 GHz, existe atenuación por la atmósfera y por las precipitaciones.



**Figura 2:** Configuraciones de comunicaciones satelitales.

La mayoría de los satélites que proporcionan servicio de enlace punto a punto operan en la *banda 4/6 GHz*:

$$\text{Banda 4/6 GHz} = \begin{cases} \text{Canal ascendente: } & 5.925 \text{ a } 6.425 \text{ GHz} \\ \text{Canal descendente: } & 3.7 \text{ a } 4.2 \text{ GHz} \end{cases}$$

En una transmisión continua y sin interferencias, no se puede transmitir y recibir en el mismo rango de frecuencias. Por eso es necesario usar bandas de frecuencias distintas.

Debido a las grandes distancias involucradas, se produce un retardo de propagación del orden de un cuarto de segundo.

#### 1.4. Ondas de radio

- Son omnidireccionales. No necesitan antenas parabólicas.
- Adecuado a la difusión simultánea a varios destinos.
- Menos sensibles a la atenuación por lluvia.

#### 1.5. Infrarrojos

- Comunicación mediante transmisores/receptores que modulan luz infrarroja no coherente, que deben estar alineados directamente.
- No pueden atravesar paredes, por lo que es más seguro y menos susceptible a interferencias.
- No hay regulación al respecto.

## 2. Propagación inalámbrica

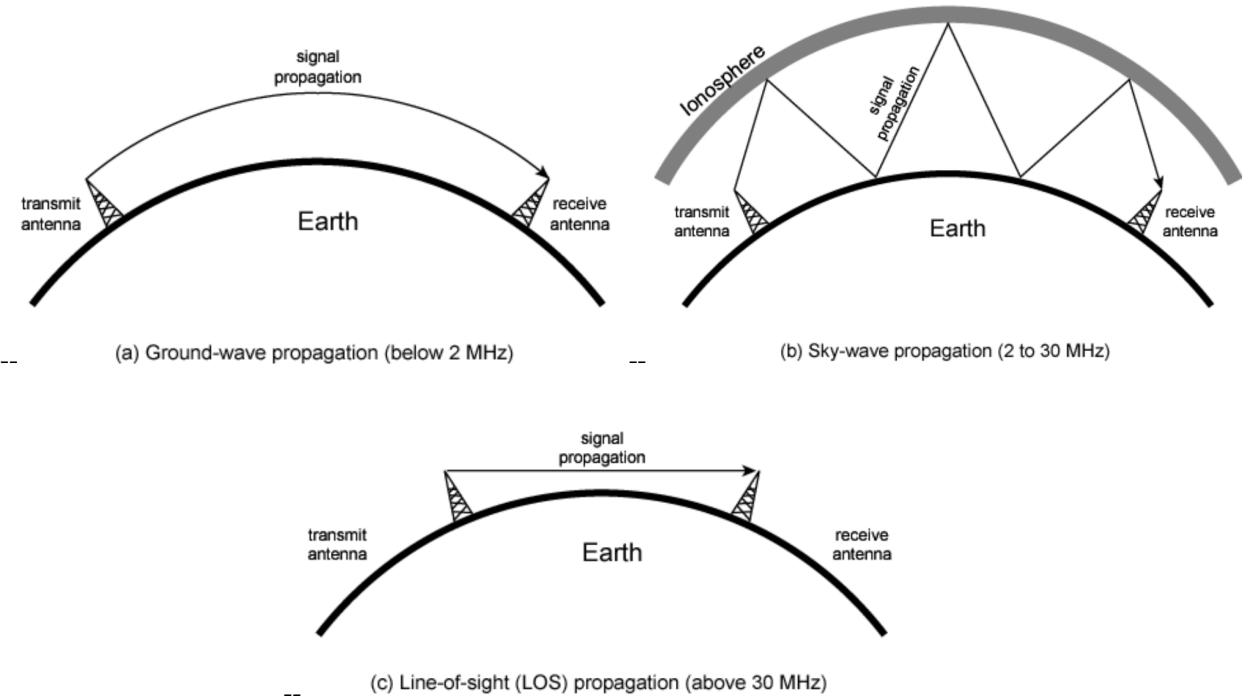
Toda señal radiada por una antena puede seguir tres posibles trayectorias: la superficial (GW, *ground wave*), la aérea (SW, *sky wave*) o la visual (LOS, *line of sight*).

### 2.1. Propagación superficial de ondas (GW)

Sigue el contorno de la superficie terrestre, alcanzando grandes distancias. Este efecto se da hasta 2 MHz. Hay varios factores para que esto ocurra: la onda electromagnética induce una corriente en la superficie terrestre, provocando que la señal se curve; además, sucede un efecto de difracción que ayuda a la curvatura.

### 2.2. Propagación área de ondas (SW)

La señal proveniente de la antena terrestre se refleja en la capa ionizada de la atmósfera alta, volviendo así hacia la tierra. La señal se propaga entonces dando saltos. Es usado por los radio-aficionados.



**Figura 3:** Distintos tipos de propagación inalámbrica.

### 2.3. Propagación en la trayectoria visual (LOS)

Por encima de 30 MHz, el modo SW no funciona. Para este modo de transmisión, la antena emisora y la receptora deben estar alineadas según la trayectoria visual *efectiva* (las microondas son refractadas por la atmósfera). Por lo general, las microondas siguen la curvatura de la tierra, por lo que llegarán más lejos que si siguieran la línea de visión óptica (Figura 4).

**Refracción:** la onda se desvía hacia el medio más denso. El **índice de refracción** de la atmósfera disminuye con la altura, por ello las ondas viajarán más rápido mientras más alejadas estén de la tierra.

### 2.4. Línea de visión óptica y efectiva

Si no hay obstáculos, la **línea de visión óptica** se puede expresar cómo:

$$d = 3,57 \sqrt{h},$$

donde  $d$  es la distancia entre la antena y el horizonte en kilómetros, y  $h$  es la altura en metros.

La **línea de visión efectiva** se expresa como:

$$d = 3,57 \sqrt{Kh},$$

donde  $K$  es un factor de ajuste por refracción ( $K \approx 4/3$ ).

La distancia máxima entre dos antenas de altura  $h_1$  y  $h_2$  está dada entonces por:

$$d = 3,57 (\sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2}).$$

## 2.5. Transmisión en la trayectoria visual

Cualquier comunicación inalámbrica se dispersa con la distancia, siendo esta la causa principal de las pérdidas en las comunicaciones satelitales. Incluso si no hubiera ruido, al aumentar la distancia, la señal se atenúa ya que va aumentando su área ocupada. Esta atenuación se denomina **pérdida en el espacio libre** y se calcula como:

$$\frac{P_e}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2} = \frac{(cd)^2}{f^2 A_r A_e},$$

donde el sufijo  $e$  denota antena emisora y  $r$  receptora,  $d$  la separación entre las antenas,  $c$  la velocidad de la luz,  $\lambda$  la longitud de onda de la portadora, y  $A$  las áreas efectivas de las antenas.

Se puede reescribir la ecuación de pérdida como:

$$L_{dB} = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 10 \log(A_r A_e) + 169,54 \text{dB},$$

por tanto, cuanto mayor  $\lambda$ , mayor pérdida. Así también, a más altas frecuencias, menos pérdidas.

## 2.6. Multitrayectorias

La señal se refleja en tantos obstáculos que llegan varias versiones de la misma señal con retardos diferentes.

## 2.7. Pérdidas de desvanecimiento

Término	Pondera	Factores	Valores
30 log D	La diversidad modal	D Distancia	La distancia visual entre antenas, en Km
10 log (6A B F)	El entorno de propagación	A Factor de rugosidad	4 = espejos de agua, ríos muy anchos, etc. 3 = sembrados densos; pastizales; arenales 2 = bosques (la propagación va por encima) 1 = terreno normal 0.25 = terreno rocoso desparejo
		B Factor climático	1 = áreas marinas o con condiciones de peor mes, anualizadas 0.5 = áreas tropicales calientes y húmedas 0.25 = áreas mediterráneas de clima normal 0.125 = áreas montañosas de clima seco y fresco
		F Frecuencia	La frecuencia medida en GHz
10 log (1 - R)	El objetivo de confiabilidad	R Confiabilidad	La confiabilidad esperada o convenida, como un decimal

**Figura 5:** Tabla de pérdidas por desvanecimiento. La fórmula resultante de la **pérdida por desvanecimiento**  $L_d$  en decibelios está dada por la suma de cada uno de los términos de la primera columna.

### 3. La Capa de Enlace de Datos (CED)

Provee los algoritmos para lograr una comunicación confiable y eficiente entre dos máquinas adyacentes<sup>1</sup>.

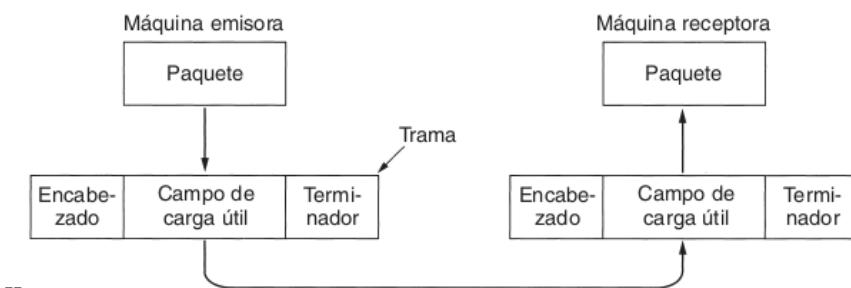
Existe una serie de problemas y limitaciones al sólo hecho de transmitir bits:

- Hay errores ocasionales.
- La tasa de datos es finita.
- Hay retardo de propagación.

#### 3.1. Cuestiones de diseño

La capa debe desempeñar varias funciones específicas, incluidas:

1. Proporcionar una interfaz de servicio bien definida con la capa de red.
2. Manejar los errores de transmisión.
3. Regular el flujo de datos para evitar saturar receptores lentos.
4. **Primordial:** el armado y manejo de tramas<sup>2</sup>.



**Figura 6:** Relación entre los paquetes y las tramas.

##### 3.1.1. Servicios proporcionados a la capa de red (CdR)

El principal es el de transferir los datos de la CdR en la máquina origen a la CdR de la máquina destino.

La CED puede diseñarse para ofrecer varios tipos de servicios:

**Servicio no orientado a la conexión sin confirmación de recepción.** Consiste en hacer que el origen envíe tramas independientes al destino sin pedir que éste confirme la recepción. Si una trama se pierde, la CED no hace ningún intento por detectar la pérdida y recuperarse de ella. Es apropiado cuando el BER (*bit error rate*) es bajo, o cuando el tráfico es en tiempo real (telefonía).

**Servicio no orientado a la conexión con confirmación de recepción.** Se confirma de manera individual la recepción de cada trama enviada. De esta manera, el emisor sabe si la trama ha llegado bien o no. Si no ha llegado en un tiempo específico, puede reenviarse. Es útil en canales inestables (sistemas inalámbricos).

**Servicio orientado a la conexión con confirmación de recepción.** El origen y destino establecen una conexión antes de transferir datos. Cada trama enviada estará enumerada, y la CED garantizará que cada trama llegue a su destino, una sola vez y en el orden adecuado. Aquí, las transferencias tendrán tres fases distintas:

1. Establecer conexión, inicializando en ambos lados variables y contadores.
2. Transmitir una o más ramas.

<sup>1</sup>Dos máquinas conectadas por un canal de comunicaciones que actúa de manera conceptual como un alambre, es decir, los bits se reciben en el mismo orden en el que son enviados.

<sup>2</sup>La capa de enlace de datos toma de la capa de red los paquetes y los encapsula en tramas.

### 3. Cerrar conexión y liberar recursos.

Nota: proporcionar confirmaciones de recepción en la CED sólo es una optimización, no un requisito.

#### 3.1.2. Entramado

La capa física acepta un flujo de bits puros e intenta entregarlo al destino, sin garantizar ausencia de errores. La CED debe ser capaz detectar y corregir los errores. Para ello, divide el flujo de bits en tramas separadas, calcula la **suma de verificación** (*checksum*) de cada una, y se las adjunta. Al llegar a destino, se recalcula el *checksum* y, si es distinto al contenido en la trama, se sabe que hubo un error y se toman medidas para arreglarlo.

Para la división en tramas del flujo de bits, se necesita una forma de detectar el inicio y fin de cada trama. Para evitar depender de la temporización (que es riesgoso a causa de demoras imprevistas), se han creado otros métodos:

**Conteo de caracteres.** El entramado contiene un campo en el encabezado para especificar el número de caracteres en la trama. La CED de destino ve la cuenta de caracteres y sabe entonces donde está el fin de la trama.

*Problema:* la cuenta puede alterarse por un error de transmisión, por lo que no hay forma de saber donde termina y donde comienza la otra trama.

**Banderas con relleno de caracteres.** Evita el problema de tener que resincronizar luego de un error, haciendo que cada trama inicie y termine con bytes especiales. Generalmente son la misma, por lo que dos banderas seguidas señalan el inicio y fin de una trama. Se puede dar con facilidad un *payload*<sup>3</sup>. Para evitarlo, se inserta un byte de escape especial justo antes de cada bandera en los datos, y es removido en el destino por la CED. Si además aparece el símbolo de escape en los datos, también se le aplica el mismo procedimiento.

*Problema:* Está fuertemente atada a caracteres de 8 bits. No funciona con tamaños arbitrarios.

**Banderas de inicio y fin, con relleno de bits.** Solventa el problema del método anterior, al utilizar bits en vez de caracteres. Cada trama comienza y termina con una bandera (01111110). Si encuentra cinco bits 1 consecutivos en los datos, le inserta un bit 0 al final, que se remueve al llegar al destino por la CED (para evitar banderas en los datos).

**Violaciones de codificación en la capa física.** Sólo se aplica cuando la codificación contiene redundancia (transición a mitad del intervalo). Las violaciones del código (bajo→bajo ó alto→alto) delimitan la trama.

#### 3.1.3. Control de Errores

Se plantea el problema: ¿Cómo asegurar que todas las tramas realmente se entreguen en el orden apropiado? Para resolverlo, se pueden ir implementando las siguientes opciones:

- Exigir al receptor que regrese tramas de control especiales que confirmen la recepción o no de cada trama.
- Implementar temporizadores de espera de confirmación de recepción, que al expirar reenvíen la trama “fallida”. El intervalo de espera debe ser lo suficientemente grande para esperar la ida y vuelta de las trama.
- Asignar números de secuencias a las tramas enviadas para evitar que el receptor acepte la misma trama múltiples veces.

<sup>3</sup>Al trabajar con datos binarios, el patrón de bits que aparece en los datos a transmitir puede coincidir con el de una bandera.

### 3.1.4. Control de Flujo

¿Qué hacer cuando el receptor recibe más tramas de las que puede aceptar a causa de un emisor rápido?

Para evitar que el receptor pierda las tramas que recibe, se utilizan dos métodos:

**Control de flujo basado en retroalimentación.** El receptor regresa información al emisor autorizándolo para enviar más datos o indicándole su estado.

**Control de flujo basado en tasa.** Se limita la tasa a la que el emisor envía datos, sin recurrir a la retroalimentación por parte del receptor (no se utiliza en la CED).

## 3.2. Detección y corrección de errores

Hay dos maneras de lidiar con los errores: **detectarlos solamente**, o **detectarlos y corregirlos**.

Si la transmisión es altamente confiable (*fibra óptica*), es más económico retransmitir los bloques defectuosos que surgen ocasionalmente. En caso de que haya muchos errores (*transmisión inalámbrica*), es mejor agregar suficiente redundancia para corregirlos.

## 3.3. Protocolos elementales de enlace de datos

Antes de estudiar los protocolos, se harán una serie de suposiciones:

- Las capas física, de enlace, y de red contienen procesos independientes.
- La máquina *A* envía flujos de datos a *B*.
- Se usa el servicio confiable orientado a la conexión.
- *A* tiene un suministro infinito de datos listos para ser enviados.
- Las máquinas no fallan.
- Los paquetes transmitidos de la CR a la CED contienen datos puros.
- La trama contiene información de control (encabezado), un paquete, y un *checksum* (terminador).
- La CF recibe una trama, calcula su *checksum*. Si no está dañada, revisa el encabezado y luego le pasa el paquete a la CR, sin el dicho encabezado ni el terminador.
- El canal es inestable y pierde tramas completas ocasionalmente.
- Se usa un temporizador en el emisor.

### 3.3.1. Protocolo simplex sin restricciones

Los datos se transmiten solo en una dirección; las capas de red siempre están listas; se ignora el tiempo de procesamiento; espacio infinito de búfer; el canal nunca tiene problemas ni pierde tramas; el emisor está en un ciclo infinito que sólo envía tramas.

### 3.3.2. Protocolo simplex de parada y espera

Ahora la CED no tiene un espacio infinito de búfer. Entonces, se debe evitar que el emisor saturé al receptor: se soluciona haciendo que el receptor retroalimente al receptor, enviándole una señal de confirmación de recepción para transmitir la próxima trama (**parada y espera**).

Las tramas viajan en ambas direcciones: se necesitaría un canal físico semiduplex.

### 3.3.3. Protocolo simplex para un canal con ruido

Ahora se comenten errores en el canal: las tramas pueden salir dañadas o perderse. Pero suponemos que si se dañó, podremos detectarlo al calcular el *checksum*.

Se agrega un temporizador para esperar por la trama de confirmación (que puede perderse).

Para evitar aceptar tramas duplicadas, se les agrega un número de secuencia de 1 bit (0 ó 1). El receptor espera un número de secuencia en particular, y si cuando llega una trama esta tiene el número correcto, se acepta y se envía a la CR. A continuación, el número de secuencia se invierte, y se avisa de esto al emisor para que envíe otra trama (**PAR, confirmación de recepción positiva con retrotransmisión**).

## 3.4. Protocolos de ventana corrediza

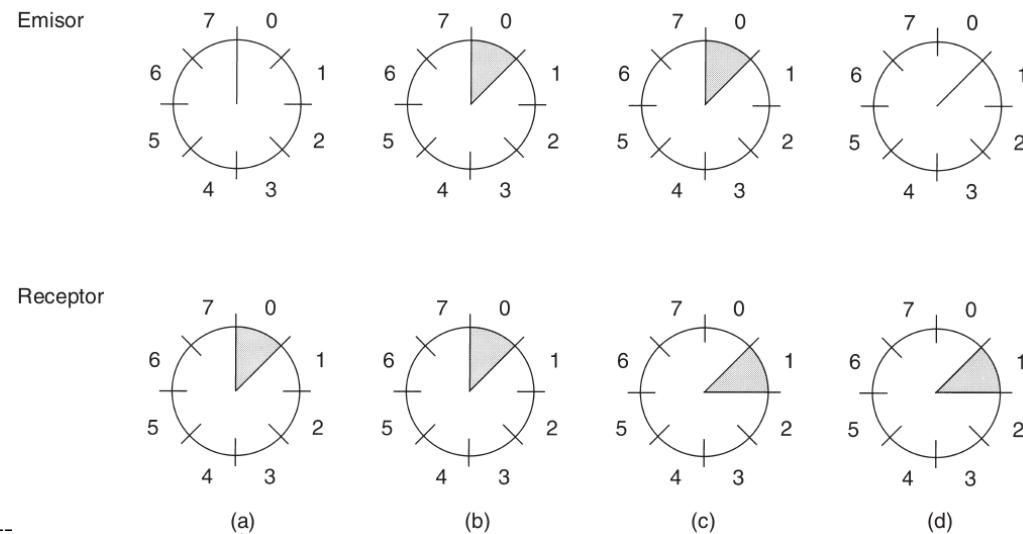
En la mayoría de las aplicaciones se necesitan transmitir datos en ambas direcciones. Se mezclan las tramas de confirmación de recepción con la de datos. Analizando el encabezado se puede distinguir si es una u otra.

**Piggybacking.** Cuando llega una trama de datos, el receptor aguanta y espera un lapso fijo de tiempo hasta que la CR le pasa el siguiente paquete, y entonces la confirmación de recepción se anexa al tramo de datos de salida (viajando gratuitamente). Esto mejora el uso del ancho de banda y los tiempos de procesamiento.

Pero, si dado un cierto lapso de tiempo no llega ningún nuevo paquete, la CED envía una trama de confirmación de recepción independiente.

**Ventana corrediza.** Clase de protocolos bidireccionales. Cada trama de salida contiene un número de secuencia de 0 a  $2^n - 1$ , para un campo de  $n$  bits. Posee dos tipos de ventanas (que no necesitan poseer el mismo tamaño):

- **Ventana emisora:** en cualquier instante, el emisor mantiene un grupo de números de secuencia que corresponde a las tramas que tiene permitido enviar. Dados que estas pueden perderse o dañarse, el emisor debe mantener todas estas tramas en su memoria para su posible retransmisión (necesita  $n$  búferes).
- **Ventana receptora:** de manera similar, en el receptor se mantiene el grupo de tramas que tiene permitido aceptar. Al recibir un trama, si no está en la ventana, es descartada; de lo contrario, se envía a la CR, se genera una confirmación de recepción y se incrementa la ventana en uno.



**Figura 7:** Ventana corrediza de tamaño 1, con un número de secuencia de 3 bits. (a) Al inicio. (b) Tras la transmisión de la primera trama. (c) Tras la recepción de la primera trama. (d) Tras recibir la primera confirmación de recepción.

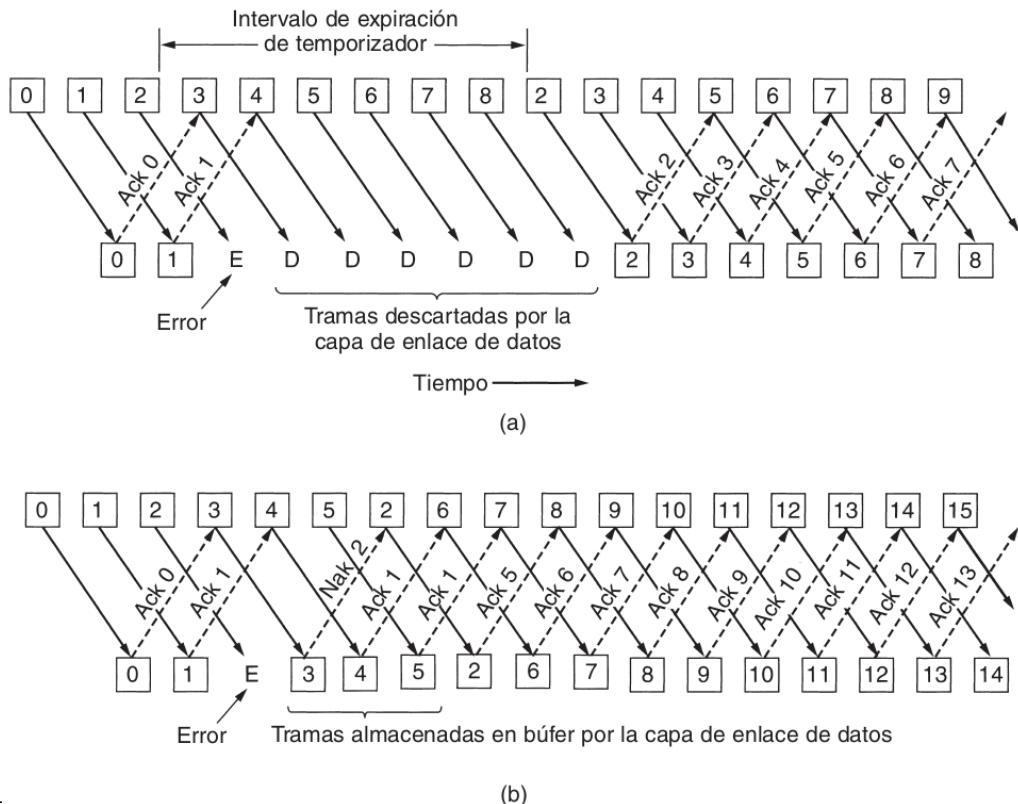
### 3.4.1. Ventana corrediza de un bit

Utiliza parada y espera, con un  $n = 1$ .

### 3.4.2. Protocolo que usa retroceso N

Si el tiempo necesario para que una trama llegue al receptor más el necesario para que la confirmación de recepción regrese no es despreciable, nos enfrentamos a un problema.

La solución está en la **canalización**, o sea, permitir que el emisor envíe hasta  $w$  tramas antes de bloquearse, en lugar de 1. Si el producto del **ancho de banda** por el **retardo del viaje de ida y vuelta** es grande, la ventana en el lado emisor debe ser grande. Estos dos factores indican cual es la capacidad del canal, y el emisor necesita la capacidad de llenarlo sin detenerse para funcionar eficazmente.



**Figura 8:** Canalización y recuperación de un error. Efecto del error cuando  $n = 1$  (a), y cuando  $n = \text{grande}$  (b).

Hay dos métodos básicos para manejar errores durante la canalización:

**Retroceso n:** el receptor descarta todas las tramas subsecuentes, sin enviar confirmación de recepción (*ACK*), hasta que le llega la que esperaba. Usa ventana con  $n = 1$ . Esta estrategia puede desperdiciar bastante ancho de banda si la BER es alta.

**Repetición selectiva:** se descarta una trama dañada recibida, pero las tramas en buen estado recibidas después de ésa se almacenan en un búfer. Cuando el emisor termina, sólo la última trama sin confirmación se retransmite. Si la trama llega correctamente, el receptor puede entregar a la CR, en secuencia, todas las tramas que ha almacenado en el búfer. Se debe agregar un temporizador por cada trama pendiente en el emisor. La retransmisión de una trama específica puede ser acelerada incluyendo una confirmación de recepción negativa (*NAK*) que avise que no se recibió esa trama correctamente, evitando esperar a que expire el temporizador asociado.

La recepción no secuencial introduce cierto problema: una vez que el receptor ha avanzado su ventana, el nuevo intervalo de números de secuencia válidos se traslapea con el anterior, por lo que podría haber tramas duplicadas. Para evitar esto, el tamaño de la ventana debe ser como máximo

la mitad a la cantidad los números de secuencia. Ejemplo:

4 bits para números de secuencia  $\Rightarrow$  16 números  $\neq \Rightarrow$  ventana de tamaño máximo 8 [0,..,7].

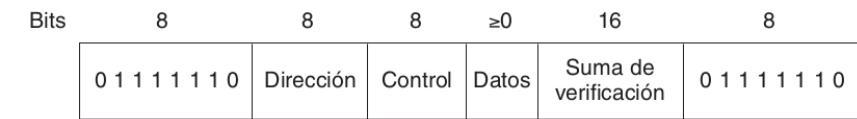
La cantidad de búferes y temporizadores asociados necesarios es igual al tamaño de la ventana.

Nota: La primera estrategia se enfoca en el ancho de banda, y la segunda en el tamaño del búfer. Dependiendo de que recurso sea más valioso, se usará una u otra.

### 3.5. Ejemplos de protocolos de Enlace de Datos

#### 3.5.1. HDLC - Control de Enlace de Datos de Alto Nivel

Es orientado a bits y usa relleno de bits para lograr la transparencia de los datos.



**Figura 9:** Formato de trama para protocolos orientados a bits.

Posee los siguientes campos (ver Figura 9):

**Dirección.** Sirve para identificar cada terminal en múltiples terminales. A veces se usa para distinguir los comandos de las respuestas.

**Control.** Se utiliza para números de secuencias, ACK, y otros propósitos.

**Datos.** Contiene cualquier información y es de longitud variable.

**Checksum.** Código de redundancia cíclica.

La trama está delimitada por otra secuencia de bandera (01111110).



**Figura 10:** Campo de *Control* de una trama (a) de información, (b) de supervisión, y (c) no numerada.

Hay tres tipos de tramas, que difieren entre sí en la información del campo de *control*. Estas son:

##### 1. Información.

- *Secuencia*. Número de secuencia de la trama.
- *Poll/Final (P/F)*. Cuando se indica *P*, se invita a la terminal a enviar datos. Cuando se usa *F*, se marca el final de envío de datos.
- *Siguiente*. Confirmación de ACK superpuesta (cuál es la siguiente trama esperada).

##### 2. Supervisión. Las distintas tramas poseen diferentes valores en el campo *Tipo*:

- *RECEIVE READY (Tipo 0)*: se utiliza como ACK cuando no hay superposición.
- *REJECT (Tipo 1)*: indica que se ha detectado un error. Se pide al receptor retransmitir todas las tramas desde la indicada en el campo *Siguiente* en adelante.

- *RECEIVE NOT READY (Tipo 2)*: las tramas enviadas han sido aceptadas, pero indica que se detenga el envío. Señala problemas temporales en el receptor.
  - *SELECTIVE REJECT (Tipo 3)*: como REJECT, pero pide sólo la retransmisión de la trama especificada.
3. **No numerada.** Se usa para el control pero también para llevar datos cuando se usa un *servicio no confiable*. Varía mucho entre los distintos protocolos.

### 3.5.2. PPP - Protocolo Punto a Punto

Realiza detección de errores, soporta múltiples protocolos, permite la negociación de direcciones de IP en el momento de la conexión, permite la autenticación y tiene muchas otras funciones. Está orientado a bits y usa relleno de bytes, por lo que todas las tramas tienen un número entero de bytes.

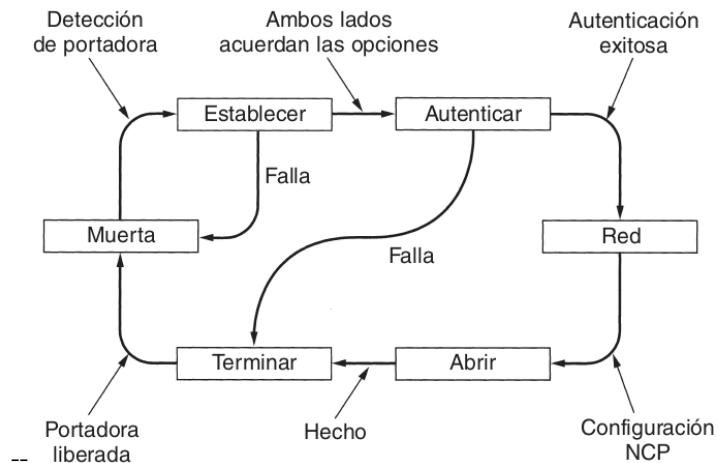
Proporciona además tres características:

1. Entramado sin ambigüedades en el final y el inicio. El formato de trama también maneja detección de errores.
2. **Protocolo de Control de Enlace (LCP)**, para activar líneas, probarlas, negociar opciones y desactivarlas ordenadamente.
3. **Protocolo de Control de Red (NCP)**, para negociar opciones de CR con independencia del protocolo de red usado.

Bytes	1	1	1	1 o 2	Variable	2 o 4	1
	Bandera 01111110	Dirección 11111111	Control 00000011	Protocolo	Carga útil	Suma de verificación	Bandera 01111110
--							

**Figura 11:** Formato de trama completa PPP para el modo de operación no numerado. El tamaño de la *carga útil* por *default* es de 1500 bytes, con relleno si es necesario.

PPP soporta detección de errores, negociación de opciones, compresión de encabezados y no proporciona de manera predeterminada transmisión confiable. Opcionalmente, se puede tener transmisión confiable con formato de tramas similar al de HDLC.



**Figura 12:** Diagrama de fases simplificado para activar y desactivar una línea. PPP inicia en *Muerta*.

## 4. La Subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC)

Esta sección es sobre las redes que usan difusión y sus protocolos. En cualquier red de difusión el asunto clave es la manera de determinar quién puede utilizar el canal cuando hay competencia por él. Los protocolos usados para determinar esto pertenecen a una subcapa inferior de la CED llamada subcapa de **Control de Acceso al Medio (MAC)**.

La MAC se encarga de la topología lógica de la red y del método de acceso a ésta. Cada tecnología de red tiene una subcapa MAC diferente. Además, aquí residen las direcciones MAC.

### 4.1. El problema de asignación del canal

*¿Cómo se asigna un solo canal de difusión entre varios usuarios?*

#### 4.1.1. Asignación estática de canal en LANs y MANs

La manera tradicional es usando FDM (*Multiplexación por División en Frecuencia*). Si hay  $N$  usuarios, el ancho de banda se divide en  $N$  partes de igual tamaño y se le asigna una a cada usuario; de esa forma, no hay interferencia.

El dividir el canal disponible en subcanales estáticos es inherentemente ineficiente. El problema básico es que, cuando algunos usuarios están inactivos, su ancho de banda simplemente se pierde. No lo están usando, y a nadie más se le permite usarlo.

Los mismos argumentos que se aplican a la FDM se aplican a la TDM (*Multiplexación por División de Tiempo*). A cada usuario se le asigna cada  $N$ -ésima ranura de tiempo. Si un usuario no usa la ranura asignada, simplemente se desperdicia. Lo mismo se aplica si dividimos las redes físicamente. Aparte, ninguno de los métodos de asignación estática de canal funciona muy bien con el tráfico en ráfagas, pero tienen sentido cuando existe un número pequeño y constante de usuarios, y cada uno tiene suficientes datos para mantener ocupado el canal.

#### 4.1.2. Asignación dinámica de canales en LANs y MANs

Todo el trabajo aquí se basa en cinco supuestos clave, que se describen a continuación.

1. **Modelo de estación:**  $N$  estaciones **independientes**, después de generar una trama cada estación se bloquea hasta que su trama es transmitida con éxito. Probabilidad de generar una trama:  $\lambda\Delta t$ .
2. **Canal único:** solamente hay un canal para todas las estaciones y todas son equivalentes.
3. **Colisiones:** si dos estaciones transmiten simultáneamente hay colisión y las estaciones reconocen las colisiones. La trama colisionada debe retransmitirse después. Son los únicos errores.
4. a) **Tiempo continuo:** la transmisión puede iniciar en cualquier instante del tiempo, no hay reloj maestro que divida el tiempo en intervalos discretos.  
b) **Tiempo ranurado:** el tiempo se divide en ranuras de tiempo o slots, la transmisión se inicia siempre al inicio del slot.
5. a) **Detección de portadora:** las estaciones no transmiten si el canal está ocupado y pueden detectar esta situación.  
b) **Sin detección de portadora:** las estaciones no pueden detectar el canal antes de intentar usarlo, simplemente transmiten. Sólo después pueden determinar si la transmisión tuvo éxito.

### 4.2. Protocolos de acceso múltiple

**Colisión:** cuando dos o más tramas son enviadas **simultáneamente** por el canal único.

**Contienda, Contención, o Competencia:** cuando múltiples sistemas deben tratar de ganar el canal común para su uso irrestricto.

**Persistencia:** la característica de un protocolo de iniciar la transmisión al encontrar el canal libre después de esperar por él.

#### 4.2.1. ALOHA

**ALOHA puro.** Permite que los usuarios transmitan cuando tengan datos para enviar. Las tramas son transmitidas en tiempos completamente arbitrarios, y **no se verifica si el canal está ocupado antes de transmitir**. Si se produce una colisión, se espera un tiempo aleatorio y se reenvía. Si no se puede escuchar mientras se transmite, se necesitan ACKs. Uso del canal del 18%.

**ALOHA ranurado.** Divide el tiempo en intervalos discretos (requiere reloj maestro), cada uno de los cuales corresponde a una trama por vez. Las estaciones únicamente inician la transmisión al principio de cada ranura. Se reducen las colisiones. Hay un aprovechamiento del 36% del canal.

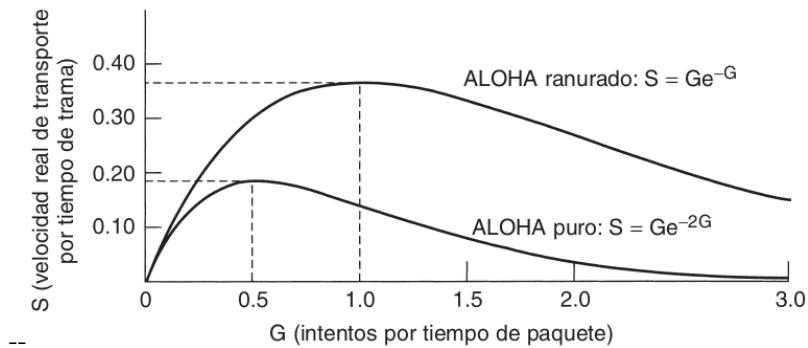


Figura 13: Velocidad real de transporte contra tráfico ofrecido en los sistemas ALOHA.

#### 4.2.2. Protocolos de acceso múltiple con detección de portadora

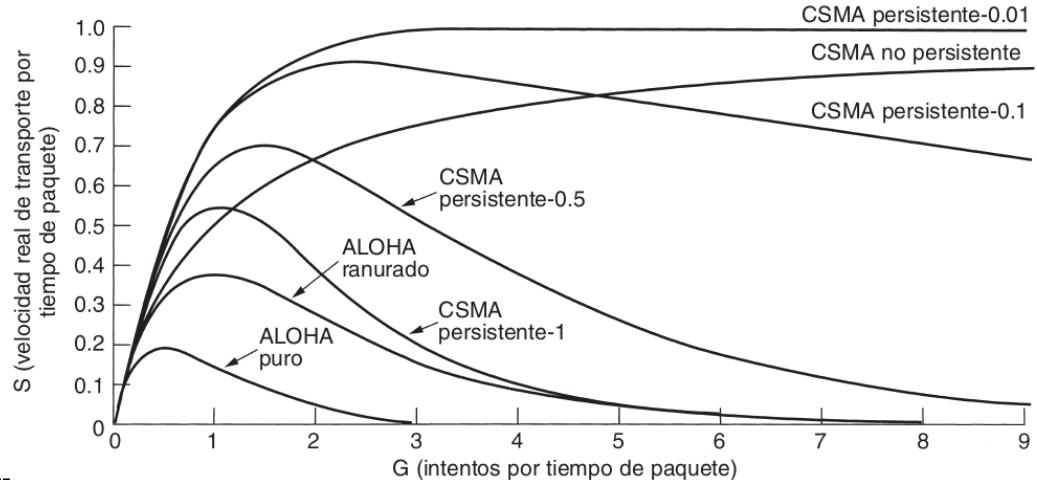
Escuchan una portadora y deciden qué hacer en consecuencia.

**CSMA (Carrier Sense Multiple Access) persistente y no persistente:**

- **Persistente-1:** el protocolo inicia la transmisión con una probabilidad 1 cuando encuentra el canal libre después de esperar. Si está ocupado, escucha **permanentemente** hasta que se libere. Si hay una colisión, espera un tiempo aleatorio y retransmite.
- **No persistente:** como el anterior, pero no escucha permanentemente, sino que espera un tiempo aleatorio, y vuelve a escuchar.
- **Persistente-p** (para canales *ranurados*): cuando una estación está lista para enviar, escucha el canal. Si éste se encuentra inactivo, la estación transmite con una probabilidad  $p$ , y con una probabilidad  $q = 1 - p$ , se espera hasta la siguiente ranura. Si esa ranura también está inactiva, la estación transmite o espera nuevamente, con probabilidades  $p$  y  $q$  respectivamente. Si está ocupada, espera a la siguiente ranura.

**CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection):** todas las estaciones abortan la transmisión tan pronto detectan la colisión, esperan un tiempo aleatorio, y retransmiten. Se utiliza en Ethernet.

El tiempo mínimo para detectar la colisión es sólo el tiempo que tarda la señal para propagarse de una estación a otra ( $2\tau$ ). Se modela el intervalo de contienda como un ALOHA ranurado con ancho  $2\tau$ . La colisión debe poder detectarse; por ello la codificación de la señal debe permitir la detección (no puede haber bits de 0 voltios). El canal debe ser semi-dúplex, debido a que se busca constantemente en busca de colisiones.



**Figura 14:** Velocidad real de transporte contra tráfico ofrecido en los sistemas ALOHA.

#### 4.2.3. Protocolos libres de colisiones

Resuelven la contención por el canal sin que haya colisiones, ni siquiera durante el periodo de contención. Suponemos que hay  $N$  estaciones, cada una con una dirección única de 0 a  $N-1$  incorporada en hardware.

**Mapa de bits.** Es un protocolo de reservación. Cada periodo de contención consiste en exactamente  $N$  ranuras. Si una estación  $j$  tiene una trama por enviar, transmite un bit 1 durante la ranura  $j$ . No está permitido a ninguna otra estación transmitir durante esta ranura. No escala bien para miles de estaciones. Eficiencia a baja carga:  $d/(N + d)$ , y a carga alta:  $d/(d + 1)$ .



**Figura 15:** Protocolo básico de mapa de bits.

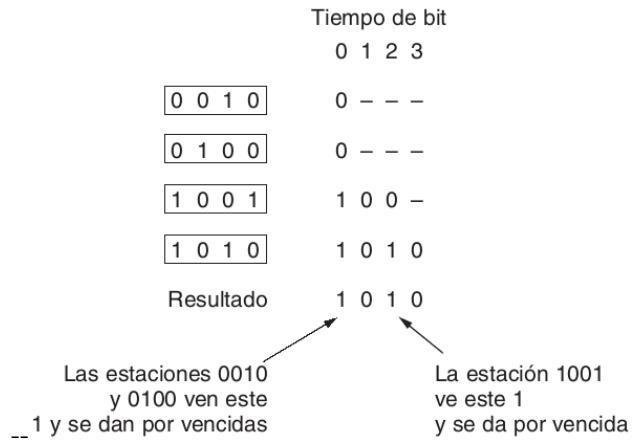
**Conteo descendente binario.** Una estación que quiere utilizar el canal ahora difunde su dirección como una cadena binaria de bits, comenzando por el bit de orden mayor. Las direcciones son combinadas con un OR. La estación que encuentra que su 0 fue sobrescrito por un 1 se rinde. Las estaciones con números grandes tienen mayor prioridad (que puede ser bueno o malo, según contexto). Su eficiencia es de  $d/(d + \log_2 N)$ .

#### 4.2.4. Protocolos de contención limitada

En condiciones de carga baja, la contención es preferible debido a su bajo retardo. A medida que aumenta la carga, la sobrecarga asociada al arbitraje del canal se vuelve mayor. Lo inverso se cumple para los protocolos libres de colisiones. Con carga baja, tienen un retardo alto, pero a medida que aumenta la carga, mejora la eficiencia del canal en lugar de empeorar.

Se combina entonces la contención y la libertad de colisiones, creando protocolos dinámicos para lograr una buena eficiencia de canal.

Primero dividen las estaciones en grupos (no necesariamente separados). Sólo los miembros del grupo 0 pueden competir por la ranura 0. Si uno de ellos tiene éxito, adquiere el canal y transmite su trama. Si la ranura permanece desocupada o si hay una colisión, los miembros del grupo 1 compiten por la ranura 1, etcétera.



**Figura 16:** Protocolo de conteo descendente binario. Los guiones indican silencios.

Se asigna de manera dinámica las estaciones a las ranuras, con muchas estaciones por ranura cuando la carga es baja y pocas estaciones (o incluso sólo una) por ranura cuando la carga es alta.

#### 4.2.5. WDMA - Protocolos de acceso múltiple por división de longitud de onda

Para permitir múltiples transmisiones al mismo tiempo, se divide el espectro en canales, y se asignan dos canales a cada estación. Se proporciona un canal estrecho como canal de control para señalizar la estación, y un canal ancho para que la estación pueda enviar tramas de datos.

Cada estación tiene dos emisores y dos receptores, como sigue:

1. Un receptor de longitud de onda fija para escuchar su propio canal de control.
2. Un emisor sintonizable para enviar por el canal de control de otra estación.
3. Un emisor de longitud de onda fija para la salida de tramas de datos.
4. Un receptor sintonizable para seleccionar al emisor de datos a escuchar.

#### 4.2.6. Protocolos de LANs inalámbricas

Tenemos dos problemas a resolver en este tipo de redes:

**Problema de estación oculta.** Una estación no puede detectar a un competidor potencial por el medio, puesto que dicho competidor está demasiado lejos.

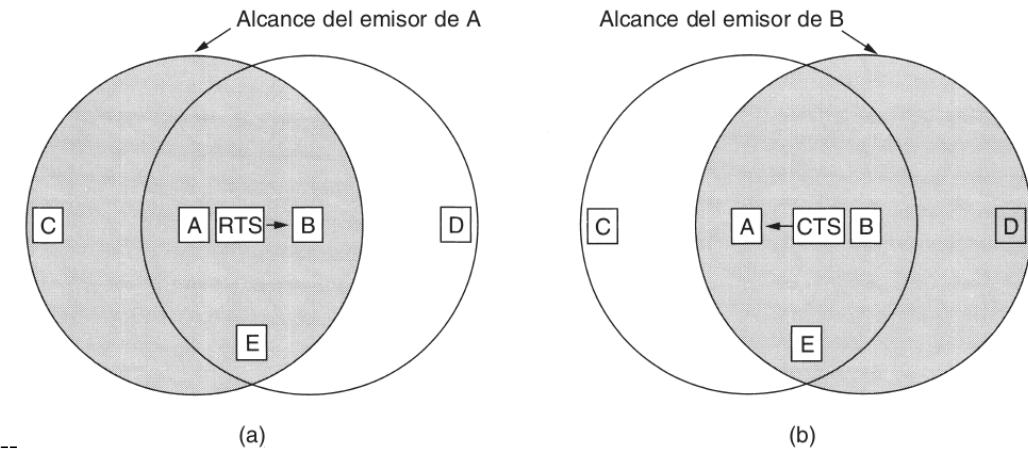
**Problema de estación expuesta.** Si una estación escucha una transmisión, puede concluir equivocadamente que no puede enviar a su estación destino (para evitar malas recepciones), pero puede que la estación destino esté suficientemente lejos de la transmisión detecta y ésta no le hace interferencia.

El problema es que antes de comenzar una transmisión, una estación realmente necesita saber si hay actividad o no alrededor del receptor.

**MACA (Acceso Múltiple con Prevención de Colisiones).** El emisor estimula al receptor a enviar una trama corta, de manera que las estaciones cercanas puedan detectar esta transmisión y evitar ellas mismas transmitir durante la siguiente trama de datos. Pasos:

1. A comienza por enviar una trama corta **RTS** (*Solicitud de Envío*) a B, que contiene la longitud de la trama de datos que seguirá posteriormente.
2. B contesta con una trama **CTS** (*Libre para Envío*), que contiene la longitud de los datos (copiada de la trama RTS). Luego A comienza a transmitir.
3. El resto de las estaciones cercanas escuchan al menos uno de los tramos, y se abstienen de transmitir durante un tiempo. Aún pueden ocurrir colisiones.

En el caso de una colisión, se espera un tiempo aleatorio y se retransmite.



**Figura 17:** El protocolo MACA. (a) *A* enviando a *B* un RTS. (b) *B* respondiendo a *A* con un CTS.

**MACAW (MACA Inalámbrico).** Mejora el desempeño del MACA al introducir ACKs (para evitar esperar expirar temporizadores), detección de portadoras (para evitar múltiples RTS), y usar retroceso por cada flujo de datos en vez de por cada estación (mejora equidad).

### 4.3. Ethernet

Todos los sistemas Ethernet usan codificación **Manchester** debido a su sencillez.

#### 4.3.1. Cableado Ethernet

Comúnmente se usan cuatro tipo de cableados (ver Figura 18):

Nombre	Cable	Seg. máx.	Nodos/seg	Ventajas
10Base5	Coaxial grueso	500 m	100	Cable original; ahora obsoleto
10Base2	Coaxial delgado	185 m	30	No se necesita concentrador
10Base-T	Par trenzado	100 m	1024	Sistema más económico
10Base-F	Fibra óptica	2000 m	1024	Mejor entre edificios

**Figura 18:** Los tipos más comunes de cableado Ethernet.

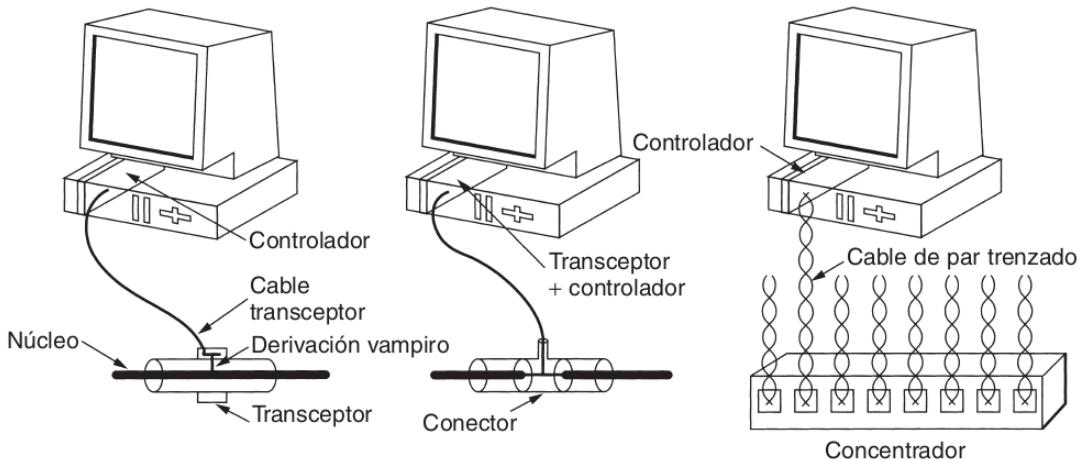
La notación es  $X\text{base}Y$ , que significa que opera a  $X$  Mbps, que utiliza señalización en la banda base, y que puede manejar segmentos de hasta  $Y \cdot 100$  metros.

**10base5.** Las conexiones se hacen usando **derivaciones vampiro**, en las que se introduce *cuidadosamente* una punta hasta la mitad del núcleo del cable coaxial. Cable muy rígido.

**10base2.** Las conexiones forman uniones T. Los conectores son más confiables y sencillos. Cable más flexible, económico y de fácil instalación.

**10base-T.** Todos los cables conducen a un **concentrador** (*hub*) central, usando pares trenzados, facilitando la detección de errores y el mantenimiento.

**10base-F.** Usa fibra óptica. Es cara debido al costo de los conectores y los terminadores, pero tiene excelente inmunidad contra el ruido y es el método a usar para conexiones entre edificios. Se permiten separaciones de kilómetros entre conexiones. Es más difícil intervenir que una de cobre (más segura).



**Figura 19:** Tres tipos de cableado Ethernet. (a) 10Base5. (b) 10Base2. (c) 10Base-T.

Un **transceptor** maneja la detección de portadora y de colisiones. Un **controlador** transmite y recibe tramas de él. Se encarga de ensamblar los datos en el formato de trama adecuado, y de calcular y comprobar el *checksum*.

#### 4.3.2. El protocolo de subcapa MAC de Ethernet

Bytes	8	6	6	2	0-1500	0-46	4
(a)	Preámbulo	Dirección de destino	Dirección de origen	Tipo	Datos	Relleno	Suma de verificación
(b)	Preámbulo	S O F	Dirección de destino	Dirección de origen	Longitud	Datos	Suma de verificación

**Figura 20:** Formatos de trama. (a) Ethernet DIX. (b) IEEE 802.3.

Algunas características de la estructura de trama original de DIX:

**Preámbulo:** contiene el patrón de bits 10101010. Sirve para sincronizar.

**Dirección de destino:** si empieza con 0, dirección ordinaria; si empieza con 1, dirección de grupo; todos 1, dirección de difusión.

**Tipo:** especifica a qué proceso darle la trama.

**Datos:** tiene una longitud mínima de:

$$\text{Destino} + \text{Origen} + \text{Tipo} + \text{Relleno} + \text{Checksum} = 64 \text{ bytes.}$$

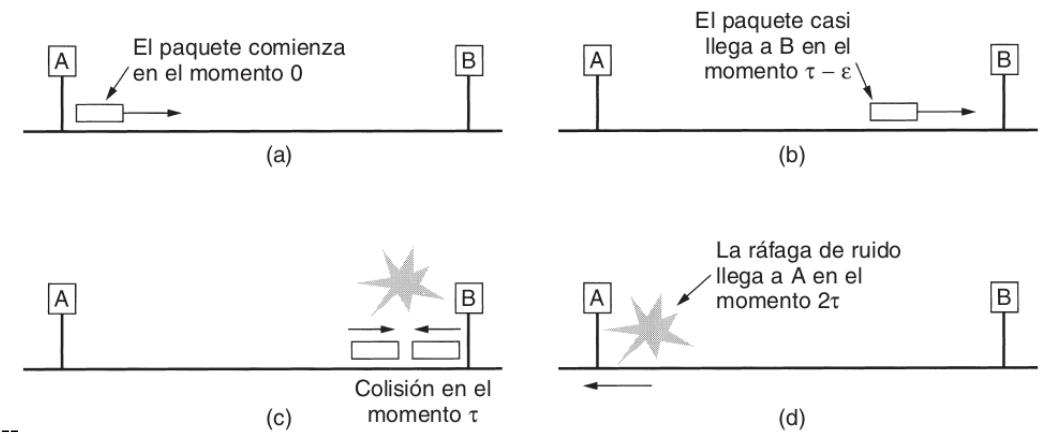
Esta longitud mínima es necesaria para evitar que una estación complete la transmisión de una trama corta antes de que el primer bit llegue al extremo más alejado del cable, donde podría tener una colisión con otra trama. **El tiempo de ida y vuelta de una trama**, a una distancia máxima de 2500 metros y a una velocidad de  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ , se determina haciendo:

$$\frac{2500}{2 \times 10^8} = 12,5 [\mu\text{s}] \quad (\text{viaje ida}),$$

$$12,5 \times 2 = 25 [\mu\text{s}] \quad (\text{ida y vuelta}),$$

$$25 + 25 = 50 [\mu\text{s}] \quad (25 [\mu\text{s}] \text{ de retroceso por repetidores}).$$

A 10 MHz, 50  $[\mu\text{s}]$  se convierten en 500 [bps], y si lo redondeamos por los 64 bytes a 512[bps], tenemos que el tiempo total de transmisión es de 51,2  $[\mu\text{s}]$ . Si aumenta la velocidad, la longitud mínima de la trama debe aumentar o la longitud máxima del cable debe disminuir.



**Figura 21:** La detección de una colisión puede tardar hasta  $2\tau$ .

Los cambios que introdujo el 802.3 fueron:

- Redujo el preámbulo a 7 bytes, y utilizar el último byte para delimitador de *Inicio de trama*.
- Cambió el campo *Tipo* por un campo *Longitud* (que marca la longitud de la trama).

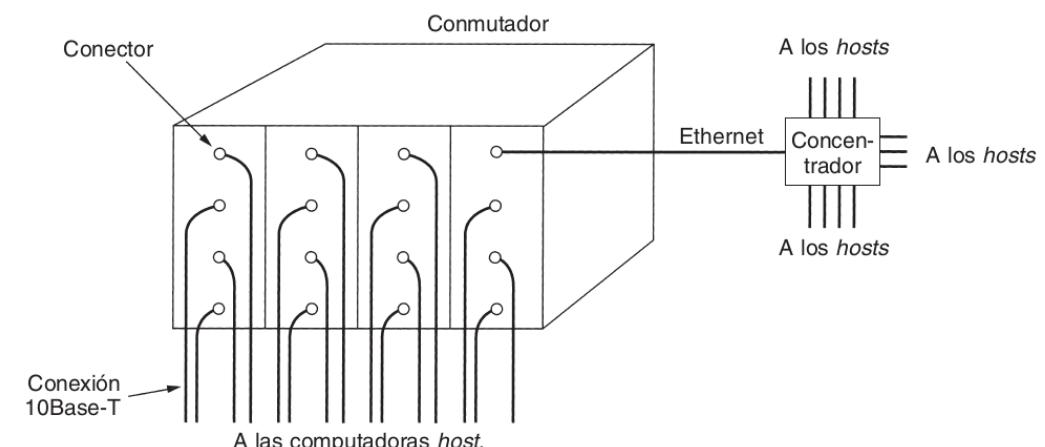
#### 4.3.3. Algoritmo de retroceso exponencial binario

Va cambiando cuánto tiempo esperar luego de una colisión para retransmitir. Cada  $i$  colisiones, se escoge un número aleatorio entre 0 y  $2^i - 1$ , y se salta ese número de ranuras. Sin embargo, tras haberse alcanzado 10 colisiones, el intervalo de aleatorización se congela en un máximo de 1023 ranuras. Tras 16 colisiones, el controlador informa de un fracaso a la computadora. La recuperación posterior es responsabilidad de las capas superiores.

Asegura retardo pequeño con pocas estaciones, resolución razonable con muchas estaciones.

#### 4.3.4. Ethernet commutada

En algún momento, la LAN se saturará al aumentar el tráfico. Una ethernet commutada trata de forma diferente con el aumento de carga, usando como base un **conmutador** (*switch*)<sup>4</sup>.



**Figura 22:** Ejemplo sencillo de Ethernet commutada.

<sup>4</sup> Contiene una matriz de conmutación de alta velocidad y espacio para 4 a 32 tarjetas de línea, cada una de las cuales contiene de uno a ocho conectores de par trenzado a un host.

Cuando una estación quiere transmitir, envía una trama estándar al conmutador. La tarjeta que recibe la trama la revisa para ver si está destinada a una de las otras estaciones conectadas a la misma tarjeta. De ser así, la trama se copia ahí. Si no, la trama se envía a través de la matriz de conmutación de alta velocidad a la tarjeta de la estación de destino.

*¿Qué ocurre si dos máquinas conectadas a la misma tarjeta de conexión transmiten tramas al mismo tiempo?* Depende de como esté la tarjeta construida:

**LAN local dentro de la tarjeta.** Se comporta como una CSMA/CD con retroceso exponencial binario. Sólo una transmisión por tarjeta en cada instante es posible. Cada tarjeta forma su propio **dominio de colisión**, independientemente de las demás. Las colisiones son imposibles y el desempeño mejora.

**Almacenamiento en RAM con búfer.** Cada trama se almacena en el búfer de su puerto. Permite recibir y transmitir múltiples tramas al mismo tiempo, formando un dúplex. Cada puerto es un dominio de colisión independiente, por lo que no ocurren colisiones. Algunos puertos pueden usarse como conmutadores.

#### 4.3.5. Fast Ethernet

El comité 802.3 decidió crear una Ethernet mejorada (y no completamente nueva, sino optimizando la anterior), que pasaría a llamarse **802.3u**, por tres razones principales:

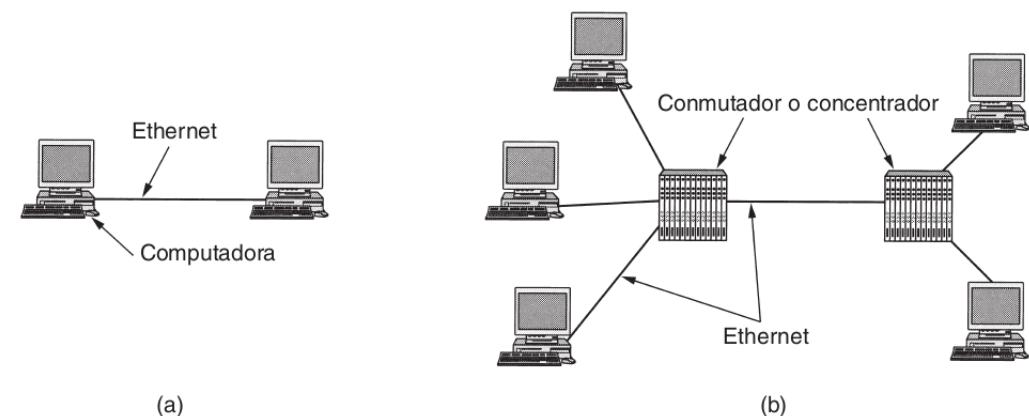
1. La necesidad de compatibilidad hacia atrás con las LANs Ethernet existentes.
2. El miedo de que un nuevo protocolo tuviera problemas no previstos.
3. El deseo de terminar el trabajo antes de que la tecnología cambiara.

Nombre	Cable	Segmento máximo	Ventajas
100Base-T4	Par trenzado	100 m	Utiliza UTP categoría 3
100Base-TX	Par trenzado	100 m	Dúplex total a 100 Mbps (UTP cat 5)
100Base-FX	Fibra óptica	2000 m	Dúplex total a 100 Mbps; distancias largas

**Figura 23:** El cableado original de Fast Ethernet.

#### 4.3.6. Gigabit Ethernet

Los objetivos del comité **802.3z** eran esencialmente los mismos que los del comité 802.3u: hacer que Ethernet fuera 10 veces más rápida y que permaneciera compatible hacia atrás con todos los estándares Ethernet existentes. Todas las configuraciones de Gigabit Ethernet son de punto a punto en lugar de múltiples derivaciones como en el estándar original.



**Figura 24:** (a) Ethernet de dos estaciones. (b) Ethernet con múltiples estaciones.

Gigabit Ethernet soporta dos modos diferentes de funcionamiento:

**Dúplex total:** modo “normal”, el cual permite tráfico en ambas direcciones al mismo tiempo. Se utiliza cuando hay un commutador central conectado a computadoras (o a otros commutadores) en el periférico.

**Semi-dúplex:** se utiliza cuando las computadoras están conectadas a un concentrador en lugar de a un commutador.

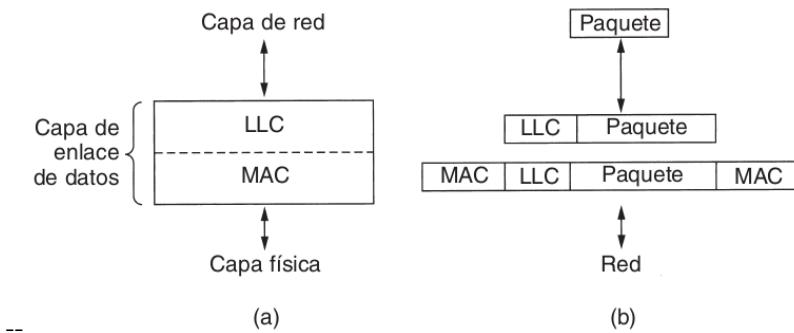
Nombre	Cable	Segmento máximo	Ventajas
1000Base-SX	Fibra óptica	550 m	Fibra multimodo (50, 62.5 micras)
1000Base-LX	Fibra óptica	5000 m	Sencilla (10 $\mu$ ) o multimodo (50, 62.5 $\mu$ )
1000Base-CX	2 pares de STP	25 m	Cable de par trenzado blindado
1000Base-T	4 Pares de UTP	100 m	UTP categoría 5 estándar

**Figura 25:** Cableado de Gigabit Ethernet.

#### 4.3.7. Estándar IEEE 802.2: control lógico del enlace

Hay sistemas en los que se desea un protocolo de enlace de datos con control de errores y control de flujo. El protocolo **LLC** (**Control Lógico del Enlace**), esconde las diferencias entre los distintos tipos de redes 802, proporcionando un formato único y una interfaz con la capa de red.

La capa de red de la máquina emisora pasa un paquete al LLC usando las primitivas de acceso del LLC. A continuación, la subcapa LLC agrega un encabezado LLC que contiene los números de secuencia y confirmación de recepción. La estructura resultante se introduce entonces en el campo de carga útil de una trama 802 y se transmite. En el receptor ocurre el proceso inverso.



**Figura 26:** (a) Posición del LLC. (b) Formatos de protocolo.

El LLC proporciona tres opciones de servicio: servicio no confiable de datagramas, servicio de datagramas sin confirmación de recepción y servicio confiable orientado a la conexión. El encabezado LLC contiene tres campos:

**Punto de acceso de destino.** Indica de cuál proceso proviene la trama.

**Punto de acceso de origen.** Indica a dónde se va a enviar.

**Campo de control.** Contiene números de secuencia y de confirmación de recepción. Se utilizan principalmente cuando se necesita una conexión confiable en el nivel de enlace de datos.

#### 4.3.8. Retrospectiva de Ethernet

La razón principal de su longevidad es su simpleza y flexibilidad, que se traduce en la práctica como confiable, barato y fácil de mantener. Además, interactúa fácilmente con TCP/IP.

## 4.4. LANs inalámbricas (VLANs)

Pueden funcionar con o sin estación base.

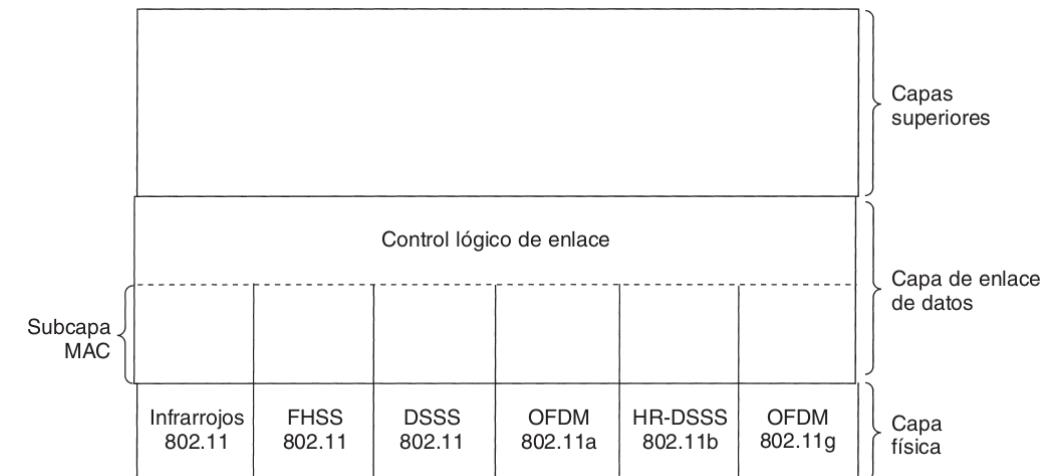


Figura 27: Parte de la pila de protocolos del 802.11.

### 4.4.1. La capa física del 802.11

#### Infrarrojos:

- Utiliza transmisión difusa (no requiere línea visual).
- Se permiten dos velocidades: 1 y 2 Mbps.
- No puede penetrar paredes, por lo que trabaja en celdas aisladas.

#### FHSS (Espectro Disperso con Salto de Frecuencia):

- Utiliza 79 canales de 1 MHz cada uno.
- Utiliza un generador pseudo-aleatorio (más *seguridad*) de números para crear la secuencia a saltar de frecuencias.
- **Tiempo de permanencia** en cada frecuencia debe ser < 400 mseg.
- Insensible a la interferencia.
- Bajo ancho de banda.

#### DSSS (Espectro Disperso de Secuencia Discreta):

- Restringido a 1 o 2 Mbps.
- Similitudes con el CDMA, pero usa **secuencia Barker**.
- Utiliza modulación por desplazamiento de fase a 1 Mbaudio.

#### OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) [802.11a]:

- Envía hasta 54Mbps en banda ancha de 5 GHz.
- Utiliza 52 frecuencias diferentes: 48 para datos y 4 para sincronización.
- Mejor inmunidad a la interferencia de bandas estrechas.
- Buena inmunidad al desvanecimiento de múltiples rutas.

#### HR-DSSS (DSSS de Alta Velocidad) [802.11b]:

- 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz.

- Las tasas sde datos soportadas son de 1, 2, 5.5, y 11 Mbps. Las dos primeras usan PSK y las dos más rapidas usan códigos **Walsh/Hadamard**.

#### 802.11g:

- Versión mejorada de la 802.11b.
- Utiliza OFDM en la banda 2.4 GHz.
- Límite teórico de 54 Mbps.

#### 4.4.2. El protocolo de la subcapa MAC del 802.11

Existen los problemas de estaciones ocultas/expuestas. Además, la mayoría de las radios son semidúplex, lo que significa que no pueden transmitir y escuchar ráfagas de ruido al mismo tiempo en una sola frecuencia. Por ello no utiliza CSMA/CD (como Ethernet).

Para sobreponerlo, se soportan diferentes modos de funcionamiento:

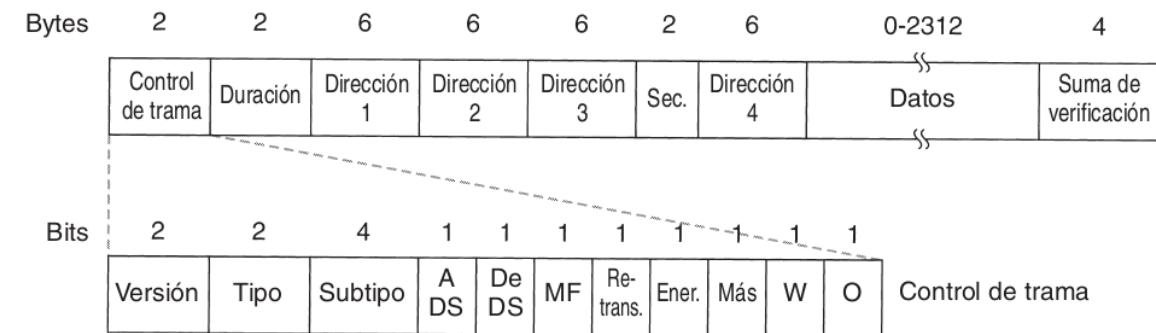
**DFC (Función de Coordinación Distribuida):** no utiliza ningún tipo de control central.

**PCF (Función de Coordinación Puntual):** utiliza la estación base para controlar toda la actividad en su celda.

**Combinación de ambos (DFC y PCF).**

#### 4.4.3. La estructura de trama 802.11

Define tres clases diferentes de tramas en el cable: de datos, de control y de administración.



**Figura 28:** La trama de datos 802.11.

El formato de la trama de datos está dado por:

1. **Control de trama.** Está compuesto de 11 subcampos:

- *Versión del protocolo:* permite varias versiones al mismo tiempo en una misma celda.
- *Tipo:* de datos, control o de administración.
- *Subtipo:* RTS o CTS por ejemplo.
- *A DS:* va hacia el sistema de distribución entre celdas.
- *De DS:* viene del sistema de distribución entre celdas.
- *MF:* “*more fragments*”, vienen más fragmentos.
- *Retransmisión:* marca una retransmisión de una trama.
- *Administración de energía:* pone o saca al receptor del estado de hibernación.
- *Más:* tramas adicionales por entregar.
- *W:* se usó WEP (Privacidad Inalámbrica Equivalente).

- *O*: las tramas vienen ordenadas.
- Duración.** Indica cuánto tiempo ocuparán el canal la trama y ACK.
  - Direcciones.** Dos para el destino y para el origen, y otras dos para la estaciones base de origen y destino para el tráfico entre celdas.
  - Secuencia.** Permite que se numeren los fragmentos.
  - Datos.** La carga útil.
  - Checksum.**

Las tramas de administración tienen un formato similar, excepto que no tienen una de las direcciones de la estación base porque se restringen a una celda. Las tramas de control son más cortas, tienen una o dos direcciones, y no tienen *Datos* ni *Secuencia*. Lo importante es el *Subtipo*.

#### 4.4.4. Servicios

Cada LAN inalámbrica debe proporcionar nueve servicios: cinco servicios de **distribución** y cuatro de **estación**. Los servicios de *distribución* se relacionan con la administración de membresías dentro de la celda y con la interacción con estaciones que están fuera de la celda. En contraste, los servicios de *estación* se relacionan con la actividad dentro de una sola celda.

##### Servicios de distribución:

- Asociación.** Conecta estaciones móviles con estaciones base.
- Disociación.** Rompe relaciones de estaciones.
- Reasociación.** Cambia estación base preferida de una estación.
- Distribución.** Determina enrutamiento de tramas.
- Integración.** Maneja la traducción.

##### Servicios de estación:

- Autenticación.** Primero debe autentificarse una estación para permitírsela enviar datos.
- Desautenticación.** ¿Abandona la red? ⇒ Se desautentica.
- Privacidad.** Maneja la codificación/decodificación.
- Entrega de datos.** Las capas superiores deben tratar con detección y corrección de errores.

#### 4.7. Comutación en la Capa de Enlace de Datos

Muchas organizaciones tienen varias LANs y desean interconectarlas. Esto se realiza mediante **puentes**. Hay seis razones por lo que se podría contar con muchas LANs en una organización:

1. Debido a la autonomía de sus dueños (metas distintas).
2. Es **más económico** tener LANs dispersas y conectadas mediante puentes, que una sola gran LAN.
3. Puede ser necesario dividir una LAN en varias LANs individuales para manejar la carga.
4. Con puentes entre LANs, puede **aumentar la distancia física total cubierta**.
5. Es **más confiable**: en una gran LAN, un sólo nodo defectuoso afecta toda la red. Al agregar puentes en lugares críticos, se detiene la propagación de errores.
6. Es **más seguro**: es posible aislar partes de la red para evitar que tráfico delicado llegue a estaciones indeseadas.

Un puente que conecta  $k$  LANs diferentes tendrá  $k$  subcapas MAC y  $k$  capas físicas distintas, una para cada tipo.

#### 4.7.1. Problemas de construir puertos entre 802.3, 802.11, y 802.16

1. Cada LAN utiliza un **formato de trama distinto**. Se requiere reformatear cada trama entre los puentes de LANs distintas, lo que conlleva recursos de CPU.
2. Entre las LANs puede haber **diferencias** en la **tasa de datos**.
3. Las distintas LANs tienen **distintas longitudes máximas de trama**, por lo que se requiere descartar tramas muy grandes.
4. Ethernet no tiene **calidad del servicio** ni soporta **encriptación** en la CdE, por lo que ambas se pierden al pasar tráfico por Ethernet.

#### 4.7.2. Interconectividad local

Los *puentes* no deberían afectar de ninguna manera el funcionamiento de una LAN existente: deberían ser **transparentes**. Para ello, se requiere que:

- Trabajar en modo **promiscuo**<sup>5</sup>
- Armar una tabla de *hash* en su interior utilizando el algoritmo de **inundación**<sup>6</sup>
- Para manejar topologías dinámicas, siempre que se realiza una entrada en una tabla *hash* se le asocia también la hora de llegada de la trama. Periódicamente, se analiza la tabla de *hash* y se purga las entradas que tengan más de algunos minutos, para mantener las direcciones actualizadas.
- El procesamiento de enrutamiento para una trama entrante depende de:
  1. LAN destino = LAN origen ⇒ **descartar** la trama.
  2. LAN destino ≠ LAN origen ⇒ **reenviar** la trama.
  3. LAN destino desconocida ⇒ **inundación**.

Este algoritmo debe aplicarse cada vez que llega una trama.

#### 4.7.3. Puentes con árbol de expansión

Para incrementar la **confiabilidad**, se pueden usar dos o más puentes en paralelo entre pares de LANs. Sin embargo, este arreglo genera problemas adicionales porque produce ciclos en la topología: durante la **inundación**, se satura la red y no se resuelven las direcciones.

La solución es utilizar un **árbol de expansión**, que es acíclico y estable una única ruta de un nodo a otro. Abarca todas las LANs, pero puede no incluir a todos los puentes (para evitar ciclos).

Para construirlo, se elige un puente como raíz, y se calculan las rutas más cortas a todas las LANs y puentes. Si un puente o una LAN falla, se recalcula un nuevo árbol. El algoritmo persiste operando para detectar cambios en la topología y actualizar el árbol.

---

<sup>5</sup>Acepta todas las tramas transmitidas sobre las LANs a las cuales está conectado.

<sup>6</sup>Todas las tramas que llegan al puente con un destino desconocido se envían a todos los destinos desconocidos (excepto de los cuales provino), hasta aprender la dirección de estos destinos desconocidos (usando el algoritmo de **aprendizaje hacia atrás**).

## 5. Anexo

### 5.1. Dispositivos Físicos

A continuación una breve descripción de cada uno de ellos y, entre paréntesis, en que capa trabajan.

**Repetidores** (CF). Dispositivos análogos conectados a dos segmentos de cable. Una señal que aparece en uno de ellos es amplificada y enviada al otro. Trabajan con señales, ignorando a las tramas, paquetes o encabezados.

**Concentradores** (CF). Tiene numerosos puertos de entrada que une de manera eléctrica. Reenvía (sin amplificar) todas las tramas a todas las salidas. Es un sólo dominio de colisión: las tramas que llegan juntas, colisionan.

**Puentes** (CED). Examinan las direcciones de la CED para enrutar los datos. Reciben una trama, verifican la dirección de origen, y comprobando su tabla de *hash*, la reenvía por el puerto adecuado. Cada puerto es un dominio de colisión.

**Commutadores** (CED). Similares a los puentes, pero conectan *hosts*. Poseen búferes en cada puerto, por lo que nunca pierden tramas por colisiones (a excepción de que las tramas lleguen a más velocidad de la que se transmiten, reduciendo el espacio de búfer).

**Enrutadores** (CdR). Examinan las direcciones de los paquetes y realizan su trabajo de enrutamiento con base a ellas. Eliminan el encabezado y terminador de trama.

**Puertas de Enlace de Transporte** (CT). Conectan dos computadoras con diferentes protocolos de transporte orientados a la conexión.

**Puertas de Enlace de Aplicación** (CA). Comprenden el formato y contenido de los datos y traducen los mensajes de un formato a otro.

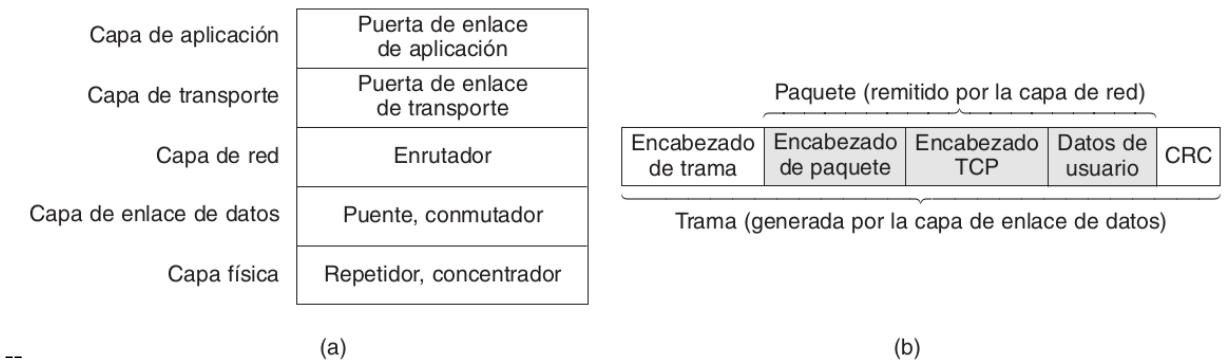
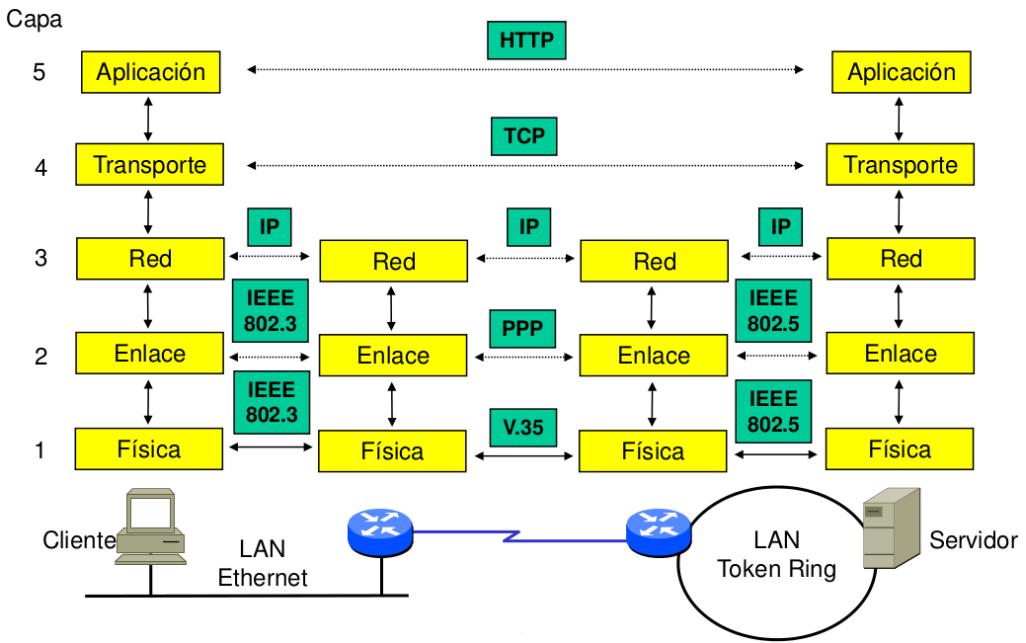


Figura 29: (a) Los dispositivos y sus capas correspondientes. (b) Tramas, paquetes y encabezados.



**Figura 30:** Acceso a un servidor Web a través de una conexión remota.

## 5.2. Parciales

### 5.2.1. Parcial I (2011)

1. Realizar un diagrama de capas OSI para 2 Host y un Router. Especificar protocolos y transferencias de datos.
2. Capa de enlace de OSI. Explicar funciones.
3. Problemas de transmisión en una comunicación. Nombrarlos y explicarlos brevemente.
4. Explicar ruido térmico y cómo se calcula.
5. ¿En qué consiste PSK?
6. Códigos de Aleatorización. Para qué se usan?. Nombrar 2.
7. Nyquist y Shannon y la relación entre ellos.
8. Realizar un diagrama de fases para 64QAM.
9. Tabla comparativa en medios guiados.
10. Enlace de microondas. Qué consideraciones hay que tener?

### 5.2.2. Recuperatorio Parcial I (2011)

1. Realizar diagrama de capas de TCP/IP con dos hosts y un router.
2. Definir los tipos de ruido y explicar uno de ellos.
3. Realizar un diagrama de fases 16PSK.
4. Definir las primitivas de modulación analógica (solamente ASK,PSK,FSK, no MFSK, BFSK, etc.).
5. Explicar como funciona QAM.
6. Explicar un método de sustitución detalladamente (son las técnicas de aleatorización).
7. Explicar como funciona la transmisión por fibra óptica.

8. Que hay que tener en cuenta para la transmision por microondas. Demostrar con formulas matematicas.
9. Realizar un grafico del espectro electromagnetico de  $10^2$  hasta  $10^{11}$  Hz (o MHz, no recuerdo) y nombrar que sistemas de transmision incluyen (algo asi era la pregunta, no me acuerdo exactamente porq ni la sabia).

### **5.2.3. Parcial II**

1. Explicar las alternativas para delimitar las tramas.
2. Explique el concepto de ventana corrediza. Ejemplifique con un gráfico el concepto de ventana corrediza de tamaño 1 y número de secuencia de 3 bits.
3. Describa el formato de la trama HDLC y explique sus campos.
4. Describa el diagrama de fase simplificado para activar y desactivar una linea PPP. En el mismo, detalle cuando estamos en presencia de LCP y cuando en presencia de NCP.
5. Explique como se calcula el tiempo  $2\tau$  (dos tau) en las redes IEEE802.3.

## **5.3. Finales**

### **5.3.1. Examen Segundo Turno Diciembre 2011**

1. Codificación de señales.  
Haga un grafico de cada una de las primitivas de codificación (Unipolar, Polar, Bipolar). Ventajas y desventajas.
2. Medio Fisico: Radio Frecuencia.  
Explique que son las microondas. Describa las ecuaciones del calculo del enlace, tanto para distancia como para potencia
3. Medio Fisico: Fibra Optica.  
Explique como funciona la fibra optica y sus clasificaciones. Demuestre el calculo de la apertura numerica y que significa este concepto
4. Capa de Enlace.  
Describa el protocolo HDLC. Su trama, su funcionamiento, en que ocasiones se usa y algun dato que quiera agregar
5. 802.11. Subcapa MAC.  
Explique el funcionamiento de la subcapa MAC de 802.11