



Resumen Redes Tanenbaum

Tecnología de las Comunicaciones (Universidad Abierta Interamericana)

Resumen de “Redes de Computadoras” de A.S. Tanenbaum

Capítulos 1 al 4

Nicolás A. Acevedo

2009 – UAI – Facultad de Tecnología Informática – Tecnología de las Comunicaciones

Capítulo 1

1 Introducción

Habla de la convergencia entre las comunicaciones y las computadoras, y el rápido crecimiento de la industria informática.

Dos computadoras están interconectadas si pueden intercambiar información.

Red de computadoras y sistema distribuido no es lo mismo. En el sistema distribuido un conjunto de computadoras independientes aparece ante sus usuarios como un único sistema consistente. Cuando esto se implemente por software, la capa que lo hace se conoce como middleware.

En las redes de computadoras no es necesario ningún middleware, y las computadoras pueden tener hardware y SO totalmente diferentes.

1.1 Usos de las redes de computadoras

En ambiente de negocios hay una necesidad de compartir recursos. Hoy en día, esto puede ser vital para el negocio. Permite romper barreras geográficas con facilidad.

Aplicación del modelo cliente-servidor. El servidor puede manejar una gran cantidad de usuario-clientes. Se involucran dos procesos, uno a cada lado. El proceso cliente envía solicitud al proceso servidor, y éste responde.

La red como medio de comunicación: correo electrónico, facilita la comunicación y la cooperación. Videoconferencia, evita viajes con sus costos y pérdidas de tiempo. *E-business*, relación directa con proveedores y *e-commerce* para clientes (vía web).

1.2 Aplicaciones Domésticas

Usos más comunes: Acceso a información remota, comunicación P2P, Entretenimiento interactivo y *e-commerce*.

Habla de WWW, e-mail, Messenger y Napster, telefonía IP, casinos virtuales, video bajo demanda (*Youtube*), *e-commerce*, *e-banking*, subastas en línea (*Mercadolibre*).

Abreviaturas utilizadas	
B2C	Bussiness to consumer – Negocio a consumidor
B2B	Bussiness to bussiness – Negocio a negocio
G2C	Government to consumer – Gobierno a consumidor
C2C	Consumer to consumer – Consumidor a consumidor
P2P	Peer to peer – Igual a igual

1.3 Usuario móviles

PDA, Oficina móvil para enviar y recibir mails, navegar en Web, acceder a archivos e iniciar sesión de forma remota. Crecimiento de las redes inalámbricas.

No es lo mismo redes inalámbricas que computación portátil...

Algunas computadoras inalámbricas no son móviles.

Fusión de teléfonos celulares con PDA, protocolo WAP. Comercio móvil (*m-commerce*), una posibilidad es utilizar el móvil como si fuera una billetera electrónica.

Inalámbrica	Móvil	Aplicaciones
No	No	Computadoras de escritorio en oficinas
No	Si	Computadora portátil usado en un cuarto de hotel
Si	No	Redes en construcciones antiguas sin cableado
Si	Si	Oficina portátil; PDA para stock

1.4 Temas sociales

- Foros, grupos, blogs, fotologs, etc.
- Límites vs. Censura
- Temas legales en general: demandas a operadores de redes por contenidos en sitios webs.
- Empleados vs empleadores: lectura de correos electrónicos y/o archivos de las computadoras.
- Gobierno vs ciudadanos: Gobierno investiga todo tipo de información que se mueve en la red (Carnivore –FBI- en EEUU).
- Idem anterior mediante cookies.
- Posibilidad de ejercer el **anonimato**: situaciones deseables e indeseables que conlleva.
- **Confiabilidad de la información**, no es lo mismo un consejo médico dado por un desertor de la carrera de Medicina o de un Premio Nobel
- Comportamientos antisociales y criminales: **robo de identidad**, **spam**, violaciones masivas de derecho de autor

2 Hardware de Redes

No hay una sola clasificación... pero hay dos que se destacan:

Por tecnología de transmisión

- Enlaces de difusión
 - Utilizan un solo canal de comunicación, un paquete enviada por una máquina es recibido por todas, las cuales leen el mismo, sino va dirigido a ellas lo ignoran, si no se procesa.
 - Los sistemas de difusión permiten direccionamiento a todos los destinos utilizando un código especial en el campo dirección: *broadcasting*.
 - También a un subconjunto de máquinas: *multicasting*.
- Enlaces de punto a punto
 - Conexiones entre pares individuales de máquinas. Un paquete para ir de origen a destino, tendría que ir por una o varias máquinas intermedias.

Por regla general, las redes más pequeñas localizadas en una misma área geográfica tienden a utilizar la difusión (ej: LAN, televisión por cable) mientras que las más grandes suelen ser punto a punto (ej: fibra óptica entre dos centrales de conmutación de Telefónica-Telecom).

Por la escala

- PAN (Personal Area Network)
 - Destinadas a una sola persona
 - Ej. Bluetooth
- LAN
 - De propiedad privada
 - Están restringidas por tamaño
 - Tradicionalmente a 10/100 Mbps, las más nuevas a 10 Gbps
 - Algunas topologías LAN de difusión
 - Bus y anillo
 - Pueden ser estáticas (tienen un tiempo asignado para transmitir, tipo Round Robin) o dinámicas (según demanda, se administra en forma centralizada a descentralizada).
- MAN
 - Ejemplo más conocido: red de TV por cable

Distancia entre procesadores	Procesadores ubicados en el mismo...	Ejemplo
1 m	Metro cuadrado	PAN
10 m	Cuarto	LAN
100 m	Edificio	
1 km	Campus	
10 Km	Ciudad	MAN
100 Km	País	WAN
1.000 Km	Continente	
10.000 Km	Planeta	Internet

- WAN
 - Abarca una gran área geográfica, ej: continente.
 - Compuesta por *hosts* y una subred de comunicación.
 - Generalmente las compañías telefónicas o ISP operan la subred.
 - La subred está compuesta por líneas de transmisión y por conmutadores o enrutadores.
 - Subred de almacenamiento y reenvío o conmutación de paquetes.
 - Algoritmo de enrutamiento decide “por donde” se envían los paquetes.
 - No todas las WAN son de conmutación de paquetes, por ej: satelital.
- Inalámbricas (3 categorías principales)
 - **Interconexión de sistemas**
Interconexiones de componentes de una computadora, *bluetooth*. Conexión sin cables sin controladores, simplicidad y facilidad.
Se utiliza el paradigma maestro-esclavo.
 - **LANs inalámbricas**
Cada computadora posee un módem de radio y una antena, y en algún lugar de la oficina una estación base conectada a la red alámbrica.
 - **WANs inalámbricas**
Telefonos celulares, red amplia pero de ancho de banda bajo.
Nuevos desarrollos con alto ancho de banda, se suele llamar servicio de distribución local multipuntos, IEEE 802.16. La mayoría de las redes inalámbricas se enlaza a la red alámbrica en algún punto.
- Redes domésticas
 - En el futuro la mayoría de los dispositivos hogareños serán capaces de comunicarse entre y acceder a Internet. Hoy en día existe pero está limitado.
 - Es importante que sean fáciles de operar, que sean confiables y con un precio bajo.
 - Es posible que se necesite capacidad suficiente como para manejar tráfico multimedia
 - Se necesita una interfaz e infraestructura estable
 - La seguridad es muy importante.
 - ¿Alámbrica o inalámbrica? La mayoría de los hogares poseen 6 redes (electricidad, teléfono, TV por cable, agua, gas y cloacas)... agregar una implica costos.
- Interredes
 - Conexión de dos o más redes.
 - Ej: conectar una LAN con una WAN, o dos LAN entre sí.
 - Regla de oro: si varias empresas pagaron por la construcción de diversas partes de la red y cada una mantiene su parte, tenemos una interred.

3 Software de Redes

3.1 Jerarquía de Protocolos

Red organizada como una pila de capas. Cada una brinda servicio a la superior sin mostrar los detalles de implementación (encapsulamiento).

Cada capa se comunica con la subyacente mediante un protocolo, un conjunto de reglas y convenciones. Violar el protocolo hará más difícil (o imposible) la comunicación.

En una comunicación entre la capa *n* de una máquina y la capa *n* de otra, se pasan los datos e información hacia abajo hasta llegar al medio físico y luego hacia arriba hasta la capa *n* de la máquina destino.

Entre cada par de capas hay una interfaz. Ésta define qué operaciones y servicios primitivos pone la capa más baja a disposición de la capa superior inmediata. Las interfaces bien definidas simplifican el reemplazo de la implementación de una capa con una implementación totalmente diferente.

Un conjunto de capas y protocolos se conoce como **arquitectura de red**. La especificación de una arquitectura debe permitir que un implementador entienda y cumpla correctamente con el protocolo a la hora de diseñar soft o hard. No es necesario que las interfaces de una red sean las mismas, siempre y cuando cada máquina pueda utilizar correctamente todos los protocolos. La lista de protocolos utilizados se conoce como **pila de protocolos**.

Cada capa agrega un **encabezado** a cada mensaje. Puede contener un número para el orden, tamaños, medidas, y otros campos de control.

La comunicación virtual se da en forma conceptual, horizontalmente entre dos capas utilizando el protocolo de esa capa. La comunicación real se efectúa “bajando” mediante las interfaces hasta la capa inferior -> medio -> destino.

3.2 Aspectos de diseño

Cada capa necesita un mecanismo para identificar a los emisores y receptores, se necesita un **direccionamiento**.

Reglas de transferencias de datos. El protocolo debe determinar cuántos canales lógicos corresponden de la conexión y cuáles son sus prioridades. Ej: Un canal para datos normales y otro para datos urgentes.

Es importante que los dos extremos de conexión estén de acuerdo sobre el **control de errores**, es decir que códigos de detección y corrección de datos se utilizan.

Control de flujo para evitar que el emisor sature al receptor.

Cuando no es posible tener una conexión para cada par de procesos de comunicación, se podría utilizar la misma conexión (en forma transparente) para múltiples conversaciones: **multiplexión** y **desmultiplexión**.

Cuando hay múltiples rutas entre el origen y el destino, hay que tener en cuenta el **enrutamiento**.

3.3 Servicios orientados a la conexión y no orientados a la conexión

El servicio **orientado a la conexión** se concibió con base en el sistema telefónico, funciona en 4 pasos:

1. Se establece la conexión
2. Se “negocian” los parámetros para la transmisión
3. Se transmite
4. Se termina la conexión

El servicio **no orientado a la conexión** se concibió con base en el sistema postal. El mensaje lleva completa la dirección de destino y cada uno se enruta a través del sistema, independientemente de los demás. No importa el orden de llegada.

Cada servicio se puede clasificar por la **calidad**, confiables o no. Los confiables confirman la recepción de los datos, lo que introduce sobrecarga y retardos. Según las necesidades confiabilidad vs. performance.

	Servicio	Ejemplo
Orientado a la conexión	Flujo confiable de mensajes	Secuencia de páginas
	Flujo confiable de bytes	Inicio de sesión
	Conexión no confiable	Voz digitalizada
No orientado a la conexión	Datagrama no confiable	Spam
	Datagrama confirmado	Correo certificado
	Solicitud-respuesta	Consulta de BD

3.4 Primitivas de servicio

Un servicio se especifica como un conjunto de primitivas (operaciones). Éstas indican al servicio que desempeñe alguna acción o reporte sobre una acción que ha tomado una entidad igual. Por lo general son llamadas al sistema en modo **kernel**. Las primitivas de servicio orientado a la conexión son diferentes de las del no orientado.

Ejemplo mínimo de primitivas en un ambiente cliente-servidor:

Primitiva	Servicio
LISTEN	Bloquea en espera de una conexión entrante
CONNECT	Establece una conexión con el igual en espera
RECEIVA	Bloquea en espera de un mensaje entrante
SEND	Envía un mensaje al igual
DISCONNECT	Da por terminada una conexión

El ejemplo del funcionamiento se puede ver en las páginas 34 y 35.

3.5 Relación de servicios a protocolos

Un **servicio** es un conjunto de primitivas que una capa proporciona a la superior. Un servicio está relacionado con la interfaz entre dos capas.

Un **protocolo** es un conjunto de reglas que rigen el formato y el significado de los paquetes (o mensajes) que se intercambiaron las entidades iguales en una capa. Las entidades utilizan protocolos para implementar sus definiciones del servicio.

El servicio y el protocolo no dependen uno del otro.

Los servicios se relacionan con las interacciones entre capas, los protocolos se relacionan con los paquetes enviados entre entidades iguales de máquinas diferentes.

4 Modelos de referencia

4.1 OSI (Interconexión de sistemas abiertos)

Está basado en una propuesta desarrollada por ISO como un primer paso hacia la estandarización internacional de los protocolos utilizados en varias capas.

Tiene 7 capas.

1. Capa **física**

- Transmisión de bits puros a través de un canal de comunicación o medio.
- Define voltajes, tiempos, como establecer la conexión, cuando terminarla.
- Trabaja con interfaces mecánicas, eléctricas y de temporización
- Se encarga del medio físico.

2. Capa de **enlace de datos**

- Transformar un medio de transmisión en una línea de comunicación.
- Fragmenta los datos en **tramas de datos**
- El receptor confirma devolviendo una **trama de confirmación de recepción**
- Regulación de flujo
- Manejo de errores
- En redes de difusión ¿cómo controlar el acceso al canal compartido? Lo hace la subcapa de control de acceso al medio

3. Capa de **red**

- Controla las operaciones de la subred
- Determina como se enrutan los paquetes



- Maneja problemas de enrutamiento
 - En redes de difusión el problema de enrutamiento es simple, por lo que la capa en ocasiones no existe
4. Capa de **transporte**
 - Aceptar los datos provenientes de las capas superiores, dividirlos en unidades más pequeñas si es necesario, pasarlo a la capa de red y asegurarse de que todas las piezas lleguen correctamente al otro extremo.
 - Determina qué tipo de servicio proporcionar a la capa de sesión y a los usuarios de red.
 - El tipo de conexión más popular es la punto a punto que entrega mensajes en el orden en que se enviaron.
 - Conexión extremo a extremo
 5. Capa de **sesión**
 - Permite que usuarios de máquinas diferentes establezcan sesiones entre ellos
 - Servicios:
 - i. Control de diálogo
 - ii. Administración de *token*
 - iii. Sincronización
 6. Capa de **presentación**
 - Sintaxis y semántica de la información transmitida.
 - Las estructuras de datos a intercambiar se pueden definir de una manera abstracta junto con una codificación estándar para su uso “en el cable”.
 7. Capa de **aplicación**
 - Contiene varios protocolos que los usuarios requieren con frecuencia.
 - El más utilizado hoy HTTP que se utiliza para navegar en la WWW.

4.2 TCP/IP (Protocolo de control de transmisión/Protocolo de Internet)

Una de las principales metas de diseño, al crear el modelo, fue la capacidad para conectar múltiples redes.

Otro objetivo fue que la red pudiera sobrevivir a la pérdida de hardware de la subred.

Tiene 4 capas:

1. Capa de **interred**
 - Red de conmutación de paquetes basada en una de interred no orientada a la conexión.
 - Es la pieza clave que mantiene unida a la arquitectura.
 - Permite que los *hosts* inyecten paquetes dentro de cualquier red y que éstos viajen a su destino de manera independiente.
 - Los paquetes pueden llegar en orden diferente al enviado, las capas más altas se encargan de reordenar
 - Ésta capa define el protocolo IP.
 - El enrutamiento, con el propósito de evitar congestiones, es el aspecto principal de la capa.
2. Capa de **transporte**
 - Permite que las entidades iguales en los *hosts* de origen y destino puedan llevar a cabo una conversación
 - Dos protocolos de transporte de extremo a extremo:
 - i. TCP: confiable, orientado a la conexión. Divide el flujo de bytes entrantes en mensajes discretos y pasa cada uno de ellos a la capa de interred. Maneja el control de flujo.
 - ii. UDP: no confiable y no orientado a la conexión. Amplio uso en consultas únicas de solicitud-respuesta, tipo cliente-servidor, así como en aplicaciones en las que la entrega es más importante que la confiabilidad, ejemplo: transmisión de voz o vídeo.
3. Capa de **aplicación**
 - Contiene todos los protocolos de nivel más altos:
 - i. TELNET: conexión a terminal virtual
 - ii. FTP: Transferencia de archivos
 - iii. SMTP: email
 - iv. DNS: Sistema de nombres de dominio
 - v. NNTP: para transportar artículos de noticias USENET
 - vi. HTTP: para las páginas WWW

vii. Etc.

4. Capa **host a red**

- Este protocolo no está definido y varía de un *host* a otro y de una red a otra

4.3 Comparación entre OSI y TCP/IP

- Similar funcionalidad en las capas
- Servicio de transporte independiente de extremo a extremo
- El modelo OSI define claramente los concepto de Servicio, Interface y Protocolo, TCP/IP no, aunque con el tiempo las personas han tratado de readaptarlo haciéndolo más parecido a OSI.
- Los protocolos del modelo OSI están mejor encapsulados y se pueden reemplazar fácilmente, aunque los diseñadores no tenían mucha experiencia, y no tenían una idea concreta de qué funcionalidad poner en qué capa.

Cuando OSI se implemento funcionaba en redes punto a punto, a medida que se incorporaron las de difusión, se tuvieron que integrar subcapas convergentes para documentar las diferencias. No se había pensado en la interconectividad de redes.

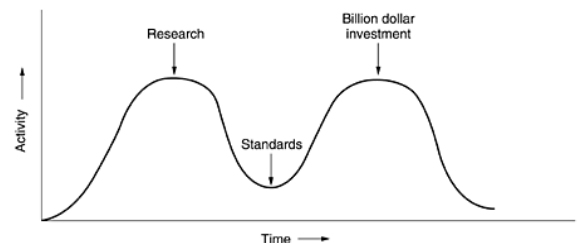
En cambio para TCP/IP los protocolos llegaron primero y el modelo es una descripción de los protocolos existentes. El problema era que el modelo no aceptaba otras pilas de protocolos por lo que no era útil para describir otras redes que no fueran TCP/IP.

Otra diferencia se encuentra en cuanto a los tipos de comunicaciones (orientada a la conexión y no-orientada). El modelo OSI soporta ambas en la capa de red, pero solo la de “orientada a la conexión” en la capa de transporte. El modelo TCP/IP sólo tiene modo “no-orientado” en la capa de red pero soporta ambos modos en la capa de transporte, lo que da a los usuarios la posibilidad de elegir.

4.4 Crítica al modelo OSI y los protocolos

OSI no triunfó porque:

- Aparición inoportuna
 - Teoría de estándares (David Clark, MIT) – Apocalipsis de los elefantes
Los estándares deben escribirse en el punto intermedio entre los dos “elefantes”.
- Mala tecnología
 - Tanto el **modelo** como los **protocolos** tienen **defectos**.
 - La elección de las **7 capas** fue más **política** que técnica.
 - Capas de **sesión y presentación** casi **vacías**.
 - Capas de **enlace de datos** y de **red saturadas**.
 - Las funciones como **direccionamiento, control de flujo y control de errores** están **presentes en varias capas**, tal vez innecesariamente. El control de errores se debe hacer en la capa superior para que sea efectivo.
- Malas implementaciones
 - Implementaciones iniciales grandes, pesadas y lentas.
 - Se asoció OSI con “**baja calidad**”.
 - En contraste, una de las primeras implementaciones TCP/IP era parte de UNIX y fue bastante buena (sin mencionar que era gratis).
- Malas políticas
 - Se creía que TCP/IP era parte de UNIX
 - Se creía que OSI era **técnicamente inferior a TCP/IP**
 - Y que OSI sería **la criatura de los ministerios de telecomunicaciones** de Europa, la comunidad europea y más tarde EEUU, que quería ser impuesto por burócratas.



4.5 Crítica del modelo de referencia TCP/IP

- No distingue claramente los conceptos servicio, interfaz y protocolo
- No está bien ajustado para describir ninguna pila de protocolos más que TCP/IP

- La capa *host* a red no es en realidad una capa, es más bien una interfaz
- No distingue capa física y de enlace a datos.
- Modelo prácticamente inexistente pero protocolos de amplio uso.

5 Redes de ejemplo

5.1 Internet

Acá esta la historia de Internet, no entra en el parcial.

Arquitectura de Internet

Ejemplo: el cliente llama a su ISP desde una conexión de línea telefónica conmutada, el módem convierte las señales digitales en análogos y se transmiten al POP (Punto de presencia) del ISP donde se inyectan en la red regional del ISP. Desde acá el sistema es totalmente digital y de conmutación de paquetes. La red regional de ISPs consta de enrutadores interconectados en las diversas ciudades donde opera. Si el paquete está destinado a un *host* servido directamente por el ISP, el paquete se entrega al *host*, caso contrario se entrega al operador de la red dorsal del ISP. Las redes dorsales constan de miles de enrutadores conectados por fibra óptica.

5.2 Redes orientadas a la conexión X.25, Frame Relay y ATM

X.25

Primer red de datos pública, se desplegó en la **década del '70**. Una computadora establecía primero una **conexión con la computadora remota vía telefónica**. Ésta conexión daba un número de conexión para utilizarlo en los paquetes de transferencia de datos. **Paquetes muy sencillos**, encabezado de 3 bytes y hasta 128 bytes de datos. El **encabezado** constaba de un número de conexión de 12 bits, un número de secuencia de paquete, un número de confirmación de recepción y algunos bits diversos. Las redes X.25 **funcionaron por casi diez años** con resultados mixtos.

Frame Relay

En los '80 las redes X.25 fueron reemplazadas por Frame Relay. Red orientada a la conexión sin controles de error ni de flujo, los paquetes se entregaban en orden. Parecido a la LAN de área amplia. Éxito modesto y aún se sigue utilizando en algunas partes.

Modo de transferencia asíncrona (ATM)

Se diseñó a principios de la década de 1990. Venía a resolver todos los problemas de conectividad y telecomunicaciones en un solo sistema integrado que pudiera proporcionar todos los servicios para todas las necesidades. Eso no sucedió, aunque goza de buena salud debido a que las empresas portadoras la utilizan principalmente para su transporte interno.

Circuitos virtuales de ATM

El envío de datos requiere que primero se envíe un paquete para establecer la conexión, con frecuencia a éstas se las conoce como **circuitos virtuales**. La mayoría de las redes ATM soportan también **circuitos virtuales permanentes**. Cada conexión tiene un solo identificador de conexión.

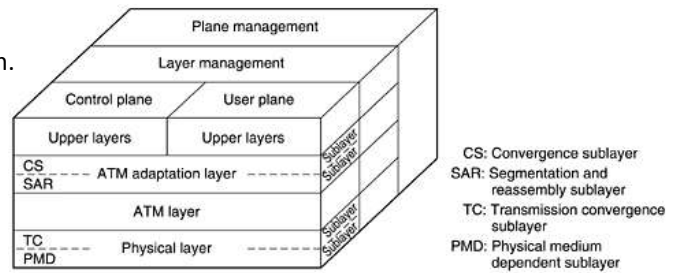
La idea es transmitir toda la información en paquetes pequeños, de tamaño fijo, llamados **celdas** de 53 bytes (5 para el encabezado), lo que permite construir fácilmente conmutadores para manejar celdas pequeñas de longitud fija. Parte del encabezado es el identificador de la conexión. La conmutación de celdas se hace en el hardware a alta velocidad. El hardware se puede configurar para enviar una celda entrante a múltiples líneas de salida (*broadcasting*). Las celdas pequeñas no bloquean ninguna línea por mucho tiempo lo que garantiza la calidad del servicio. La entrega de celdas no está garantizada pero sí el orden. A los niveles más altos de protocolos les corresponde la recuperación de celdas perdidas. Esto es mejor que la de Internet.

Las redes ATM se organizan como las WANs tradicionales, con líneas y conmutadores. Velocidades de 155 y 622 Mbps. 155 Mbps se eligió para transmitir televisión de alta definición y 622 para poder enviar cuatro canales de 155.

El modelo de referencia ATM

Diferente del OSI y TCP/IP. Tres capas: física, ATM y adaptación ATM, además de lo que el usuario desee poner sobre ellas.

- Capa física
 - Se encarga de voltajes, temporización de bits y otros.
 - No prescribe un conjunto particular de reglas
 - Especifica por donde enviar las celdas
 - ATM es independiente del medio de transmisión.
- Capa ATM
 - Se encarga de las celdas y su transporte.
 - Establece y libre los circuitos virtuales
 - Control de congestión
- Capa de Adaptación (AAL)
 - Permite enviar paquetes más grandes que una celda
 - Segmenta los paquetes en celdas y los reensambla en el otro extremo



El modelo ATM se define como si fuera tridimensional. El **plano de usuario** trata con el transporte de datos, control de flujo, corrección de errores y otras funciones de usuario. El **plano de control** se ocupa de la administración de la conexión. Cada una de las capas física y AAL se dividen en dos subredes.

La **capa física** se divide en dos subcapas:

- PMD (dependiente del medio físico)
 - Interactúa con el cable real, maneja temporización de bits.
 - La capa es diferente para diferentes transportadoras y cables.
- TC (convergencia de transmisión)
 - Generación de celdas
 - Empaque/desempaque de celdas a partir del sobre contenedor
 - Generación de tramas
 - Genera y comprueba la suma de verificación de encabezados

La **capa AAL** se divide en dos subcapas:

- SAR (segmentación y reensamble)
 - Fragmenta paquetes en celdas en el lado de transmisión
 - Los une de nuevo en destino
- CS (subcapa de convergencia)
 - Permite que los sistemas ATM ofrezcan diversos tipos de servicios a diferentes aplicaciones
 - Provee la interfaz estándar

5.3 Ethernet

Es la LAN más popular. Empezó en la Universidad de Hawaii en la década del '70, que estuvieron tratando de conectar usuarios de las islas remotas a la computadora principal de Honolulu, bajo las ordenes de Norman Abramson. Conectar cable bajo el Océano parecía imposible. La primera solución fue ALOHANET que utilizaba radios de onda corta con dos canales (uno ascendente y otro descendente). Los usuarios enviaban por el canal ascendente a la computadora central y se confirmaba la recepción por el descendente. Sino se confirmaba se reenviaba. Funcionaba bien con bajo tráfico pero se caía cuando el flujo ascendente era pesado.

Bob Metcalfe (licenciado en MIT) inició su doctorado en Harvard y conoció el trabajo de Abramson. Al graduarse viajó a Hawaii para trabajar con Abramson durante el verano, para luego empezar a trabajar en el Centro de Investigación de Palo Alto de Xerox (PARC). Allí, los investigadores habían diseñado y construido las PCs, pero las mismas estaban aisladas. Aplicando sus conocimientos sobre el trabajo de Abramson, junto con David Boggs, diseñaron e implementaron la primera red de área local en 1976, la Ethernet.

El sistema podía contener hasta 256 máquinas a 2,94 Mbps. Tenía una mejora respecto a ALOHANET; antes de transmitir, una computadora tenía que escuchar el cable para ver si había alguien más transmitiendo. También soluciona el problema que

ocurre cuando dos o más computadoras transmiten al mismo tiempo luego de esperar. DEC, Intel y Xerox diseñaron un estándar en 1978 para una Ethernet de 10 Mbps llamado estándar DIX. Luego, con dos cambios menores, en 1983, paso a ser el estándar IEEE 802.3.

Xerox mostró poco interés en comercializar Ethernet, y Meltcafe fundó 3COM. Ethernet continúa su desarrollo y actualmente hay versiones a 100, 1000 Mbps y más. Se ha mejorado el cableado y se han agregado conmutación y otras características.

Ethernet no es el único estándar de LAN, también están Token Bus (802.4) y Token Ring (802.5).

5.4 LAN's inalámbricas 802.11

Varias empresas comenzaron a comercializar LANs inalámbricas, pero existía un problema, no había compatibilidad entre ellas, por ello la industria decidió estandarizar. El comité del IEEE que se encargo de la LANs alámbricas, se encargo de éstas también. El producto fue el 802.11 más conocido como Wifi.

El estándar propuesto tenía que trabajar en dos modos:

- En presencia de una estación base
 - Toda la comunicación se hace a través de la estación base, es decir el punto de acceso.
- En ausencia de una estación base (redes ad-hoc)
 - Pueden establecerse comunicaciones entre computadoras directamente.

Los retos para crear el estándar eran: encontrar una banda de frecuencia adecuada, el rango de la señal de radio, asegurar la privacidad de las comunicaciones, tener en cuenta las baterías de los dispositivos, tener en cuenta la salud humana, comprender las implicaciones de la movilidad de las computadoras y construir un sistema con suficiente ancho de banda ara que sea económicamente viable.

Cuando comenzó el proceso de estandarización (mediados de los '90), Ethernet dominaba las LANs, por lo que el 802.11 debía ser compatible con Ethernet sobre la capa de enlace de datos. No obstante, existen algunas diferencias en las capas físicas y de enlace de datos. Primero, una computadora en Ethernet siempre escucha el medio antes de transmitir, en Wifi no es así, porque la computadora que transmite a la estación puede no estar en el alcance de la que debe escuchar antes de transmitir. Segundo problema, los objetos sólidos pueden reflejar señales de radio lo que puede derivar en **desvanecimiento por múltiples trayectorias**. Tercero, una gran cantidad de *soft* no tiene en cuenta los efectos de la movilidad. Cuarto problema, si una computadora se mueve lejos de la estación base que está usando y dentro del rango de una estación base diferente, se requiere algún tipo de manejo.

El comité presentó en 1997 un estándar que se ejecutaba a 1 o 2 Mbps, como era lenta se empezó a trabajar en estándares más rápidos presentados en 1999: **802.11a** (banda de frecuencia más ancha – 54 Mbps), **802.11b** (misma banda que el 802.11 con otra modulación – 11 Mbps) y **802.11g** (misma modulación que 802.11a con la banda de frecuencia del 802.11b).

6 Estandarización de redes

Los estándares permiten incrementar el mercado de productos que se ajustan a ése estándar, lo que conduce a la producción masiva, a economías de escala en la producción, implementaciones VLSI y otros beneficios que disminuyen los precio e incrementan la aceptación.

Dos categorías de estándar:

- De **facto** (“de hecho”): simplemente surgió, sin ningún plan formal. Ej: la PC de IBM.
- De **jure** (“por derecho”): son formales, legales, adoptados por alguna institución de estandarización autorizada.

6.1 Quién es quién en el mundo de las telecomunicaciones

En 1865 representantes de muchos gobiernos de Europa se reunieron para formar el predecesor de la ITU (**Unión Internacional de Telecomunicaciones**), la cual tenía como tarea estandarizar las telecomunicaciones internacional hechas mediante el telégrafo. En 1947 la ITU se convirtió en una agencia de la ONU.

La ITU tiene 3 sectores principales:

1. Radiocomunicaciones (ITU-R)
2. Estandarización de comunicaciones (ITU-T)
3. Desarrollo (ITU-D)

De 1956 a 1993 la ITU-T se conocía como **CCITT** (Comité consultivo internacional para telegrafía y telefonía).

La ITU-T tiene miembros de cuatro clases

1. Gobiernos nacionales (alrededor de 200 miembros, casi todos miembros de la ONU)
2. De sector (alrededor de 500; compañías telefónicas, fabricantes de equipos de telecomunicación, de computadoras, de chips, compañías de medios y otras)
3. Asociados (organizaciones pequeñas que se interesan en un grupo de estudio en particular)
4. Agencias reguladoras (como la CNC)

La tarea del ITU-T es hacer recomendaciones técnicas que luego suelen convertirse en estándares. Las recomendaciones son sólo sugerencias que los gobiernos pueden adoptar o ignorar. En la práctica, si un país no adopta un estándar telefónico posiblemente quede aislado.

El trabajo verdadero de la ITU-T se realiza en sus 14 grupos de estudio, a veces de hasta 400 integrantes. Ha producido cerca de 3000 recomendaciones que ocupan cerca de 60.000 páginas de papel. Un ej. el estándar V.90 para módem de 56 kbps.

6.2 Quien es quién en los estándares internacionales

Los estándares internacionales son producidos y publicados por la **ISO (Organización de Estándares Internacionales)**. Sus miembros son las organizaciones de estándares nacionales de los 89 países miembro. La ISO emite estándares sobre un gran cantidad de temas. Se han emitido más de 13.000 estándares y tiene casi 200 comités técnicos (numerados por orden de creación). Cada TC tiene subcomités (SCs) divididos en grupos de trabajo (WGs). El trabajo real lo hacen sobre todos los WGs, integrados por más de 100.000 voluntarios en todo el mundo.

La ISO y la ITU-T suelen cooperar (la ISO es miembro de la ITU-T).

Otro representante importante del mundo de los estándares es el **IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)**, la mayor organización de profesionales del mundo. Tiene un grupo de estandarización que desarrolla estándares en el área de ingeniería eléctrica y de computación.

6.3 Quién es quién en el mundo de los estándares de Internet

Internet tiene sus propios mecanismos de estandarización. En ITU e ISO abundan los oficiales corporativos y burócratas. La gente de Internet prefiere la anarquía por cuestión de principios. Cuando se configuró ARPANET, se creó un comité informal para supervisarla. En 1983, pasó a ser el **IAB (Consejo de Actividades de Internet)** con una nueva misión: mantener a los investigadores de ARPANET y de Internet apuntando más o menos en la misma dirección. Luego el significado del acrónimo se cambió a **Consejo para la Arquitectura de Internet**. Cada uno de los aproximadamente 10 miembros encabezaba una fuerza de trabajo relacionada con algún asunto importante. Cuando se necesitaba un estándar los miembros del IAB le daban solución y después anunciaban los cambios para que lo estudiaran los estudiantes que estuvieran a cargo de la implementación del *soft* pudieran realizarlos. La comunicación se llevaba a cabo mediante un serie de informes técnicos denominados **RFCs (Solicitud de Comentario)**. Actualmente existen cerca de 3000.

Para 1989 Internet había crecido tanto que el estilo sumamente informal dejó de ser funcional. El IAB fue reorganizado, llegaron nuevos miembros que representaban un rango más amplio de organizaciones. Inicialmente fue un grupo que se autorrenovaba, más tarde se creó la **Sociedad de Internet**, integrada por gente interesada en Internet.

7 Unidades Métricas

Básicamente la idea es la siguiente, las unidades relacionadas con transmisión, son en base 10.

Las unidades relacionadas con capacidad son en base 2.

Por lo tanto...

KB	2^{10} bytes	Kbps	10^3 bits por segundo
MB	2^{20} bytes	Mbps	10^6 bits por segundo
GB	2^{30} bytes	Gbps	10^9 bits por segundo

Principales prefijos métricos

Exp.	Explícito	Prefijo	Exp.	Explícito	Prefijo
10^{-3}	0,001	mili	10^3	1.000	Kilo
10^{-6}	0,000001	micro	10^6	1.000.000	Mega
10^{-9}	0,000000001	nano	10^9	1.000.000.000	Giga
10^{-12}	0,000000000001	pico	10^{12}	1.000.000.000.000	Tera
10^{-15}	0,000000000000001	femto	10^{15}	1.000.000.000.000.000	Peta
10^{-18}	0,000000000000000001	atto	10^{18}	1.000.000.000.000.000.000	Exa
10^{-21}	0,000000000000000000001	zepto	10^{21}	1.000.000.000.000.000.000.000	Zeta
10^{-24}	0,000000000000000000000001	yocto	10^{24}	1.000.000.000.000.000.000.000.000	Yotta

Capítulo 2

1 La base teórica de la comunicación de datos

Mediante la variación del voltaje o la corriente es posible transmitir información a través del cable, podemos representar el comportamiento de la señal y analizarlo matemáticamente con una función simple del tiempo $f(t)$.

1.1 El análisis de Fourier

El matemático francés Jean-Baptiste Fourier probó que cualquier función periódica de comportamiento razonable, $g(t)$ con un período T , se puede construir sumando una cantidad (posiblemente infinita) de senos y cosenos:

$$g(t) = \frac{1}{2} c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 2\pi n f t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin 2\pi n f t$$

Series de Fourier

Donde $f=1/T$ es la frecuencia fundamental, a_n y b_n son las amplitudes de seno y coseno de los n -ésimos **armónicos** y c es una constante. Si se conoce el período T y se dan las amplitudes, la función original del tiempo puede encontrarse realizando las sumas que se muestran en la ecuación. Una señal de datos que tenga una duración finita se puede manejar con sólo imaginar que el patrón se repite una y otra vez por siempre.

1.2 Señales de ancho de banda limitado

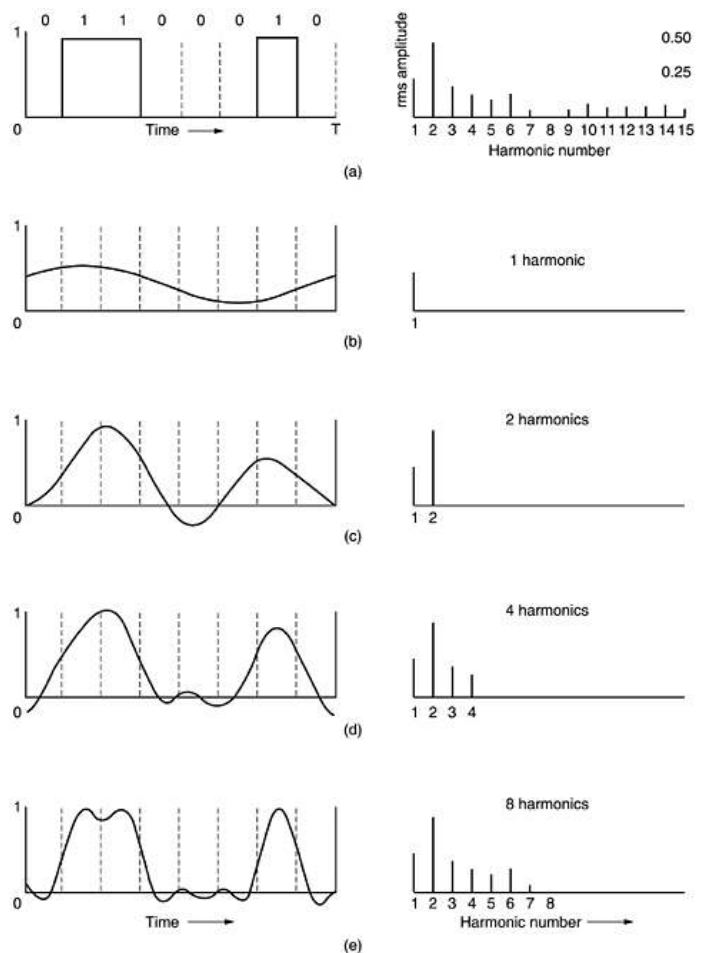
Consideremos un ejemplo: la transmisión del carácter "b" ASCII codificado en un byte de 8 bits (01100010).

El análisis de Fourier de la señal produce los coeficientes:

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(6\pi n/4)]$$

$$c = 3/4$$



En el lado derecho de la figura (a) se muestran las amplitudes de raíz cuadrada media para los primeros términos. Éstos valores son importantes porque sus cuadrados son proporcionales a la energía transmitida en la frecuencia correspondiente.

Ninguna instalación transmisora puede transmitir señales sin perder cierta potencia, y lo hace en forma desproporcionada debido a la distorsión que esas instalaciones producen. Por lo general, las amplitudes se transmiten sin ninguna disminución desde 0 hasta cierta frecuencia f_c y todas las frecuencias que se encuentren por arriba de esta serán atenuadas. El rango de frecuencia que se transmite sin atenuación se conoce como **ancho de banda**. El corte no es abrupto, por lo que el ancho de banda abraza hasta el valor de amplitud que es atenuado a la mitad de su valor original. El ancho de banda es una propiedad física del medio y depende (por lo general) de la construcción, grosor y longitud. En algunos casos se introduce un filtro para limitar el ancho de banda por cliente.

Faltan los dos últimos párrafos de pág 88

1.3 La tasa de datos máxima de un canal

En 1924, Henry **Nyquist** (ingeniero de AT&T), descubrió que incluso un canal perfecto tiene una capacidad de transmisión finita. Derivó una ecuación que expresa la tasa de datos máxima para un canal sin ruido de ancho de banda finito. En 1948, Claude **Shannon** extendió el trabajo al caso de un canal sujeto a ruido aleatorio (es decir, termodinámico).

Nyquist probó que si se pasa una señal cualquiera a través de un filtro pasa-bajos de ancho de banda H , la señal filtrada se puede reconstruir por completo tomando solo $2H$ muestras (exactas) por segundo. No tiene sentido muestrear la línea a una rapidez mayor que $2H$ veces por segundo porque los componentes de mayor frecuencia ya se han filtrado. Si la señal consiste en V niveles discretos, el teorema de Nyquist establece:

$$\text{tasa de datos máxima} = 2H \log_2 V \text{ bits/seg}$$

Ejemplo: un canal sin ruido de 3 kHz no puede transmitir señales binarias a una tasa mayor que 6000 bps.

Si el ruido aleatorio está presente, la situación se deteriora rápidamente. La cantidad de ruido térmico presente se mide por la relación entre la potencia de la señal (S) y la potencia del ruido (N), llamada **relación señal a ruido**. La relación sería S/N , pero por lo general se expresa como la cantidad $10 \log_{10} S/N$, en dB (**decibeles**).

El resultado principal de Shannon es que la tasa de datos máxima de un canal ruidoso cuyo ancho de banda es H Hz y cuya relación señal a ruido es S/N , está dada por

$$\text{Número máximo de bits/seg} = H \log_2 (1 + S/N)$$

Ejemplo: una canal con un ancho de banda de 3000 Hz y con una relación señal a ruido de 30 dB (parámetros típicos de la parte analógica del sistema telefónico) no puede transmitir más allá de 30.000 bps, sin importar cuántos niveles de señal se utilicen, ni con qué frecuencia se tomen los muestreos.

2 Medios de transmisión guiados

La capa física se encarga de transportar un flujo de datos puro de una máquina a otra, para ello es posible utilizar varios medios físicos:

2.1 Medios magnéticos

Una de las formas más comunes es almacenar datos en un medio extraíble (pendrive, CD, DVD, etc) y transportar físicamente los datos hasta el destino. Si bien no es la opción más avanzada, con frecuencia es más rentable, especialmente para aplicaciones en las que un ancho de banda alto o el costo por bit transportado es un factor clave.

2.2 Par trenzado

Aunque los medios magnéticos tienen un ancho de banda excelente, el retardo es pobre. El tiempo de transmisión se mide en minutos y horas, no en milisegundos. Para muchas aplicaciones se necesita una conexión en línea. Uno de los medios de transmisión más viejos, y todavía el más común, es el cable de par trenzado. Consiste en **dos alambres de cobre asilados** (de

1mm de grueso) **trenzados en forma helicoidal** (como una molécula de ADN), para que las **ondas de diferentes vueltas se cancelen** logrando que la radiación del cable sea menos efectiva.

La aplicación más común de este cable es en el sistema telefónico. Se pueden recorrer **varios kilómetros sin necesidad de amplificar** las señales con repetidores.

Se pueden utilizar para transmisión **analógica o digital**. El ancho de banda depende del grosor del cable y de la distancia.

Hay varios tipos: **categoría 3** consiste en 2 alambres aislados trenzados de manera delicada. Cuatro de éstos pares se agrupan (por lo regular) en una envoltura de plástico para su protección. A comienzos de 1988 se introdujeron los **categoría 5**, similares a cat 3, pero con más vueltas por centímetro, lo que produce menor diafonía y una señal de mejor calidad en distancias más largas. Este tipo de cableado se conoce como **UTP** (Par trenzado sin blindaje).

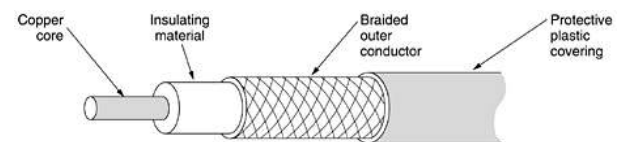


(a) Cat 3 – (b) Cat 5

2.3 Cable Coaxial

Es también muy común hoy en día. Tiene mejor blindaje y puede abarcar tramos más largos a velocidades mayores. Hay dos clases: el cable de **50 ohms** que se usa por lo general para transmisión digital, y el de **75 ohms** para transmisión analógica y televisión por cable, pero que se está haciendo cada vez más importante por el cabledem.

Consiste en un alambre de cobre rígido como núcleo, rodeado por un material aislante. El aislante está forrado con un conductor cilíndrico que con frecuencia es una malla de tejido fuertemente trenzado. El conductor externo se cubre con una envoltura protectora de plástico.



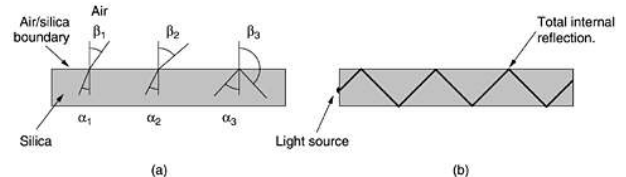
La construcción y el blindaje del cable coaxial le confieren una buena combinación de **ancho de banda alto y excelente inmunidad al ruido**. El ancho de banda depende de la calidad y longitud del cable, y de la relación señal a ruido de la señal de datos. Los más modernos **alcanzan 1 GHz**. Solían ser ampliamente usados en la **telefonía de larga distancia**, pero han sido **reemplazados por la fibra óptica**. Se utilizan ampliamente en la televisión por cable y en las MAN.

2.4 Fibra óptica

Con la tecnología actual de fibras, el ancho de banda alcanzable ciertamente está por encima de los 50.000 Gbps (50 Tbps). El límite práctico de señalización actual de aproximadamente 10 Gbps se debe a nuestra incapacidad para convertir con mayor rapidez las señales eléctricas a ópticas, aunque en el laboratorio se han alcanzado hasta 100 Gbps en una sola fibra.

Tiene 3 componentes: **la fuente de luz, el medio de transmisión y el detector**. Convencionalmente un pulso de luz indica un bit 1 y la ausencia de luz indica un 0. El medio es una fibra de vidrio ultradelgada. El detector genera un pulso eléctrico cuando la luz incide en él. Al agregar una fuente de luz en un extremo de una fibra óptica y un detector en el otro, se tiene un sistema de transmisión de datos unidireccional.

Cuando un rayo de luz pasa por un medio a otro –por ejemplo, de sílice fundida al aire–, el rayo se refracta (se dobla) en la frontera de la sílice y el aire. El grado de refracción depende de las propiedades de los dos medios. Para ángulos con incidencias mayores de ciertos valores críticos, la luz se refracta nuevamente a la sílice; ninguna parte de él escapa al aire. Por lo tanto, un rayo de luz que incide en un ángulo mayor o igual que el crítico queda atrapado dentro de la fibra y se puede propagar por varios kilómetros prácticamente sin pérdida.



Puesto que cualquier rayo de luz que incida en la frontera con un ángulo mayor que el crítico se reflejará internamente, muchos rayos estarán rebotando con ángulos diferentes. Se dice que cada rayo tiene un modo diferente, por lo que una fibra que tiene esta propiedad se denomina **fibra multimodo**. Por otro lado, si el diámetro se reduce a unas cuantas longitudes de onda de luz, la luz se puede propagar sólo en línea recta, sin rebotar, lo que da como resultado una **fibra monomodo**. Las monomodo son más

caras pero se pueden utilizar en distancias más grandes, en la actualidad pueden llegar a 50 Gbps y más de 100 km sin amplificación. En laboratorio se han logrado tasas mayores con menor distancia.

Transmisión de la luz a través de fibra óptica

Las fibras ópticas **se hacen de vidrio** que a su vez se fabrica con arena. El vidrio utilizado es **muy transparente**. La atenuación del vidrio depende de la longitud de onda de la luz.

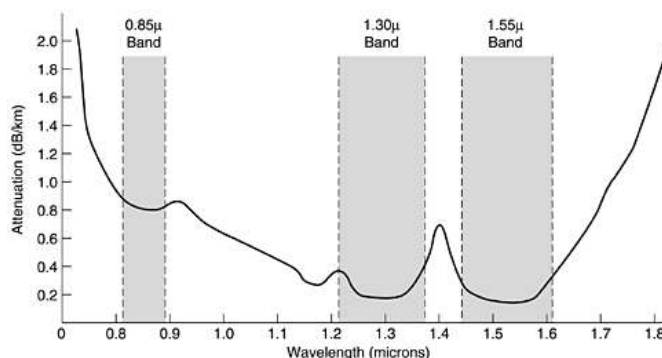
Se muestra la atenuación en decibeles por kilómetro lineal de fibra, dada por la fórmula:

$$\text{atenuación en decibeles} = 10 \log_{10} \frac{\text{potencia transmitida}}{\text{potencia recibida}}$$

La figura muestra la parte cercana al infrarrojo del espectro. La luz visible tiene longitudes de onda ligeramente más cortas, de 0.4 a 0.7 micras (1 micra = 10^{-6} metros).

Para las comunicaciones se utilizan **tres bandas de longitud de onda**, las cuales se centran en **0.85, 1.30 y 1.55 micras**. Las últimas dos tienen buenas propiedades de atenuación (menos del 5% de pérdida por kilómetro). La banda de 0.85 micras tiene una atenuación más alta. Las tres bandas tienen una anchura de entre 25.000 y 30.000 GHz.

La longitud de los pulsos de luz transmitidos por una fibra aumenta conforme se propagan. Este fenómeno se llama **dispersión cromática**.

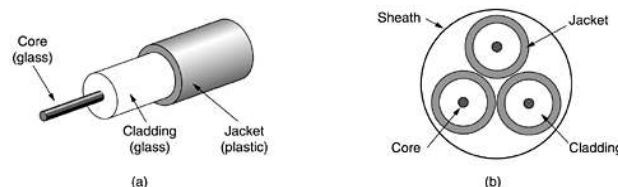


Una forma de evitar que se encimen estos pulsos dispersos es incrementar la distancia entre ellos, pero esto solamente se puede hacer reduciendo la tasa de transmisión. Se ha descubierto que al dar a los pulsos cierta forma especial relacionada con el recíproco del coseno hiperbólico, casi todos los efectos de dispersión se disipan y puede ser posible enviar pulsos a miles de kilómetros sin una distorsión apreciable de la forma. Estos pulsos se llaman **solitones**.

Cables de fibra

Son similares a los coaxiales, excepto por el trenzado. Al centro se encuentra el núcleo de vidrio. En las fibras multimodo el diámetro es de 50 micras (aprox el grosor de un cabello humano), en las monomodo el núcleo es de 8 a 10 micras.

El núcleo está rodeado por un revestimiento de vidrio con un índice de refracción menor. A continuación está una cubierta plástica delgada para proteger el revestimiento. Las fibras por lo general se agrupan en haces, protegidas por una funda exterior.



Las cubiertas de fibra terrestre por lo general se colocan en el suelo a un metro de la superficie. Las transoceánicas se entierran en zanjas mediante una especie de arado marino. En las aguas profundas, simplemente se colocan al fondo.

Las fibras se pueden conectar de tres formas diferentes:

1. Pueden terminar en conectores o insertarse en enchufes de fibra. Pierden entre 10 y 20% de la luz.
2. Se pueden empalmar en forma mecánica. Se acomodan dos extremos (cortados con cuidado) en una manga especial. Es realizado por personal especializado en 5 mins. Se pierde un 10%.

1. Se pueden fusionar que es casi tan bueno como una sola fibra aunque hay un poco de atenuación.

Existen dos clases de fuente de luz: LEDs y láseres semiconductores. Tienen propiedades diferentes y su

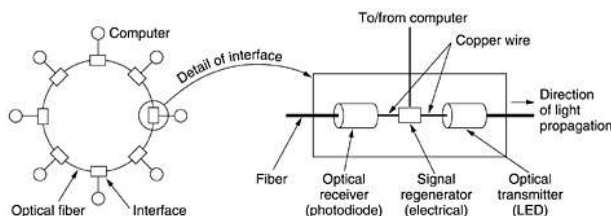
Elemento	LED	Láser semiconductor
Tasa de datos	Baja	Alta
Tipo de fibra	Multimodo	Multi o monomodo
Distancia	Corta	Larga
Tiempo de vida	Largo	Corto
Sensibilidad a la temperatura	Menor	Considerable
Costo	Bajo	Elevado

longitud de onda se puede ajustar mediante la inserción de interferómetros Fabry-Perot y Mach-Zehnder entre la fuente y la fibra.

El extremo receptor es un fotodiodo que emite un pulso eléctrico cuando lo golpea la luz. Su tiempo de respuesta típico es de 1 nseg, lo que limita las tasas de datos a aproximadamente 1 Gbps. El ruido térmico también es un problema, por lo que un pulso de luz debe llevar suficiente potencia, lo que baja la tasa de errores de manera considerable.

Redes de fibra óptica

La fibra óptica se pueden utilizar en LANs. Una forma es una red de anillo. En cada computadora se utilizó una unión T.



Se usan dos tipos de **interfaz**. Una **pasiva** que consiste en dos derivaciones fusionadas a la fibra principal. Una derivación tiene un LED (para transmitir) y la otra un fotodiodo (para recibir). La derivación misma es pasiva por completo y, por lo mismo, es extremadamente confiable, pues un LED o un fotodiodo descompuesto no romperá el anillo, sólo dejará fuera de línea a una computadora.

La otra interfaz es el **repetidor activo**. La luz entrante se convierte en señal eléctrica y se retransmite como luz. En la actualidad se utilizan también repetidores totalmente ópticos que pueden operar con anchos de banda muy altos. Si falla un repetidor activo, el anillo se rompe y la red se cae. Los enlaces pueden tener una longitud de kilómetros, ya que a diferencia de las interfaces pasivas no pierden luz en cada unión.

La topología de anillo no es la única manera de construir una LAN de fibra óptica. También es posible una **estrella pasiva**. En este diseño cada interfaz tiene una fibra que corre desde su transmisor hasta un cilindro de sílice, con las fibras entrantes fusionadas a un extremo del cilindro. Las fibras fusionadas al otro extremo, corren hacia cada uno de los receptores. Siempre que una interfaz emite un pulso de luz, ilumina a todos los receptores, con lo que se alcanza la difusión. La estrella pasiva, combina todas las señales entrantes y transmite el resultado combinado por todas las líneas. La cantidad de nodos en la red está limitada por la sensibilidad de los fotodiodos.

Comparación de la fibra óptica y el alambre de cobre

La fibra tiene muchas ventajas, puede manejar anchos de banda mucho mayores que el cobre, sólo necesita repetidores cada 50 km aproximadamente, contra casi cada 5 km cuando se usa cobre. A la fibra, las sobrecargas de energía, la interferencia electromagnética o los cortes en el suministro de energía no la afectan. Las sustancias corrosivas del ambiente tampoco la afectan.

A las compañías telefónicas les gusta la fibra porque es delgada y ligera. Muchos conductos de cable existentes están completamente llenos, pero se pueden vaciar reemplazando el cobre por fibra. Además el precio de reventa del cobre es bueno. Mil cables de par trenzado de 1 km pesan 8 Tn. Dos fibras tienen más capacidad y pesan solo 100 kgs. La fibra se impone debido a su bajo costo de instalación. Las fibras no tienen fugas de luz y es difícil intervenirlas y conectarse a ellas. Su parte negativa es que, es una tecnología poco familiar que requiere habilidades de las cuales carece la mayoría de los ingenieros; las fibras son delicadas; La transmisión óptica es unidireccional; y, finalmente, las interfaces de fibra cuestan más que las eléctricas.

3 Transmisión Inalámbrica

3.1 El espectro electromagnético

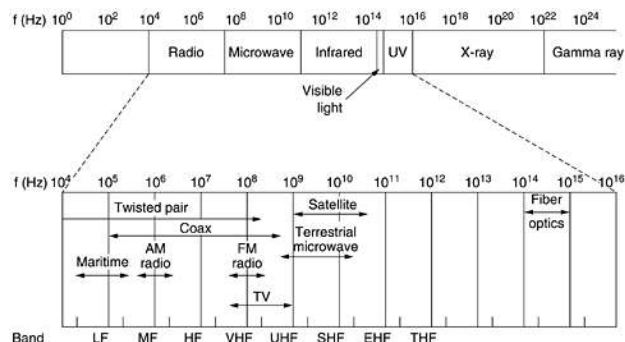
Cuando los electrones se mueven crean ondas electromagnéticas que se pueden propagar por el espacio libre (aún en el vacío). La cantidad de oscilaciones por segundo de una onda electromagnética es su **frecuencia** f y se mide en **Hz**. La distancia entre dos puntos máximos (o mínimos) consecutivos se llama **longitud de onda** y se designa de forma universal con la letra griega λ (lambda).

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad, no importa cuál sea su frecuencia. Esta velocidad, por lo general llamada **velocidad de la luz** c , es de aproximadamente 3×10^8 m/seg. En el cobre o fibra óptica, la velocidad baja a casi 2/3 de este valor y se vuelve ligeramente dependiente de la frecuencia.

En el vacío... $\lambda f = c$

Por lo tanto, las ondas de 100 MHz son de aproximadamente 3 metros de longitud.

Se presenta el espectro electromagnético. Las porciones de radio, microondas, infrarojo y luz visible del espectro pueden servir para transmitir información modulando la amplitud, frecuencia o fase de las ondas. La luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma serían todavía mejores, pero son difíciles de producir y modular, no se propagan bien entre edificios y son peligrosos para los seres vivos.



La cantidad de información que puede transportar una onda electromagnética se relaciona con su ancho de banda. Con la tecnología actual, es posible codificar unos cuantos bits por hertz a frecuencias bajas, pero a frecuencias altas el número puede llegar hasta 8, de modo que un cable coaxial con un ancho de banda de 750 MHz puede transportar varios gigabits/seg.

Dado el ancho de una banda de longitud de onda, $\Delta\lambda$, podemos calcular la banda de frecuencia correspondiente, Δf , y a partir de ella, la tasa de datos que puede producir la banda. Considere la banda de 1.30 micras, $\Delta f \approx 30$ THz. A 8 bits/Hz obtenemos 240 Tbps.

La mayoría de las transmisiones ocupa una banda de frecuencias estrecha a fin de obtener la mejor recepción (muchos watts/Hz). En algunos casos se utiliza una banda ancha, con dos variaciones. En el **espectro disperso con salto de frecuencia**, el transmisor salta de frecuencia en frecuencia cientos de veces por segundo. La señal directa siempre llega primero al receptor, las señales reflejadas siguen una trayectoria más larga y llegan más tarde. Para ése entonces, tal vez el receptor ya haya cambiado de frecuencia y no acepte señales de la frecuencia anterior, con lo que se elimina la interferencia entre las señales directas y reflejadas. Esta técnica es utilizada por el 802.11 y Bluetooth, entre otros.

El **espectro disperso de secuencia directa** está ganando popularidad en el mundo comercial. En particular, algunos teléfonos móviles de segunda generación lo utilizan, y dominará en los de tercera generación, gracias a su buena eficiencia espectral, inmunidad al ruido y otras propiedades. Algunas LANs inalámbricas también lo utilizan.

Por el momento, supondremos que todas las transmisiones utilizan una banda de frecuencia estrecha.

3.2 Radiotransmisión

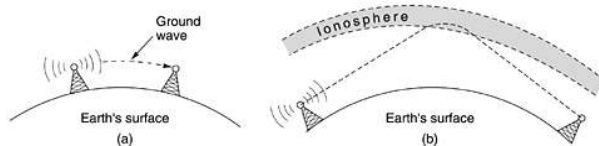
Las ondas de radio son fáciles de generar, pueden viajar distancias largas, penetrar edificios sin problemas y son omnidireccionales (no es necesario que transmisor y receptor estén alineados físicamente).

Las propiedades de las ondas de radio dependen de la frecuencia. A bajas frecuencias, éstas ondas cruzan bien casi cualquier obstáculo, pero la potencia se reduce de manera drástica a medida que se aleja de la fuente. A frecuencias altas, las ondas de radio tienden a viajar en línea recta y a rebotar en los obstáculos. También son absorbidas por la lluvia. Las ondas están sujetas a interferencia por los motores y otros equipos eléctricos.

La interferencia entre usuarios es un problemas, por ello los gobiernos reglamentan estrictamente el uso de radiotransmisores.

En las **bandas VLF, LF y MF** las ondas de radio **siguen la curvatura de la Tierra** y se pueden detectar quizá a **1000 km** en las frecuencias más bajas y a menos en frecuencias más altas. El problema principal al usar bandas para comunicación de datos su **ancho de banda bajo**.

En las **bandas HF y VHF**, las ondas a nivel del suelo tienden a ser



absorbidas por la tierra. Las ondas que alcanzan la **ionosfera**, se **refractan** y se envían de regreso a nuestro planeta. Los operadores de radio aficionados usan éstas bandas para conversar a **larga distancia**. El ejército se comunica también en éstas bandas.

3.3 Transmisión por microondas

Por encima de los 100 MHz las ondas viajan en línea recta y, por lo tanto, **se pueden enfocar** en un haz estrecho. Concentrar toda la energía en un haz pequeño con una antena parabólica produce una relación señal a ruido mucho más alta, pero **las antenas** transmisora y receptora **deben estar bien alineadas entre sí**. Permite que varios transmisores alineados en una fila se comuniquen sin interferencias con varios receptores en fila, siempre y cuando se sigan algunas reglas de espaciado. Antes de la fibra óptica, estas microondas formaron durante décadas el corazón del sistema de transmisión telefónica de larga distancia. Con torres de 100m de altura, se instalan repetidores cada 80 km.

Las microondas no atraviesan bien los edificios. Algunas ondas pueden refractarse en las capas atmosféricas más bajas y tardar un poco más en llegar que las ondas directas. Las ondas diferidas pueden llegar fuera de fase con la onda directa y cancelar así la señal. Este efecto se llama **desvanecimiento por múltiples trayectorias** y con frecuencia es un problema serio que depende del clima y de la frecuencia.

La creciente demanda de espectro obliga a los operadores a usar frecuencias más altas. Las bandas de hasta 10 GHz ahora son de uso rutinario, pero con las de aproximadamente 4 GHz surge un problema: son absorbidas por el agua. La única solución es interrumpir los enlaces afectados por la lluvia y enrutar la comunicación por otra trayectoria.

Se utiliza tanto para la comunicación telefónica de larga distancia, los teléfonos celulares, la distribución de la televisión, etcétera, que el espectro se ha vuelto muy escaso. Esta tecnología tiene varias ventajas significativas respecto a la fibra. La principal es que no necesita derecho de paso y son relativamente baratas.

Las políticas del espectro electromagnético

Hay acuerdos nacionales e internacionales acerca de **quién utiliza cuáles frecuencias**. Los gobiernos nacionales asignan espectros para la radio AM y FM, la televisión y los teléfonos móviles, así como para las compañías telefónicas, la policía, la marina, la navegación, la milicia, el gobierno y muchos otros usuarios en competencia. A nivel mundial, una agencia de la ITU-R (WARC) trata de coordinar esta asignación de manera que se puedan fabricar los dispositivos que operan en diversos países.

Incluso cuando una parte del espectro se ha asignado para un uso particular, como para los teléfonos móviles, existe el aspecto adicional de cuál empresa portadora tiene permitido utilizar cuáles frecuencias.

Un enfoque totalmente diferente para asignar frecuencias es no asignarlas por completo. Se regula la potencia utilizada de manera que las estaciones tengan un rango tan corto que no interfieran entre ellas. La mayoría de los gobiernos han apartado algunas bandas de frecuencias, llamadas bandas **ISM** (industriales, médicas y científicas) de uso no autorizado. Los dispositivos para abrir puertas de garaje, teléfonos inalámbricos, juguetes controlados por radio, ratones inalámbricos y muchos otros dispositivos utilizan las bandas ISM. La ubicación de estas bandas varía un poco de país a país.

3.4 Ondas infrarrojas y milimétricas

Las ondas infrarrojas y milimétricas no guiadas se usan mucho para la comunicación de corto alcance. Todos los controles remotos la utilizan. Son relativamente direccionales, económicos y fáciles de construir. No atraviesan los objetos sólidos, lo cual es una ventaja por el asilamiento que produce. No es necesario obtener licencia del gobierno para operar el sistema. La comunicación infrarroja tiene un uso limitado en el escritorio; por ejemplo, para conectar computadoras portátiles e impresoras.

3.5 Transmisión por ondas de luz

La señalización óptica sin guías se ha utilizado durante siglos. Una **aplicación moderna es conectar las LANs de dos edificios por medio de láseres montados en sus azoteas**. Como **es unidireccional** necesitaría un láser y un fotodetector en cada extremo. **Ancho de banda muy alto** y costo muy bajo. Relativamente fácil de instalar y **no requiere una licencia**.

Sin embargo, apuntas un rayo láser de 1mm de anchura a un blanco del tamaño de la punta de un alfiler a 500 mts de distancia requiere buena puntería. Por lo general, se añaden lentes al sistema para desenfocar ligeramente al rayo.

Desventaja, los rayos láser no pueden penetrar lluvia ni niebla densa. Funciona bien en días soleados, aunque se conocen casos en los que el calor del sol causó corrientes de convección que se elevaban hasta el techo de un edificio y desviaba al rayo.

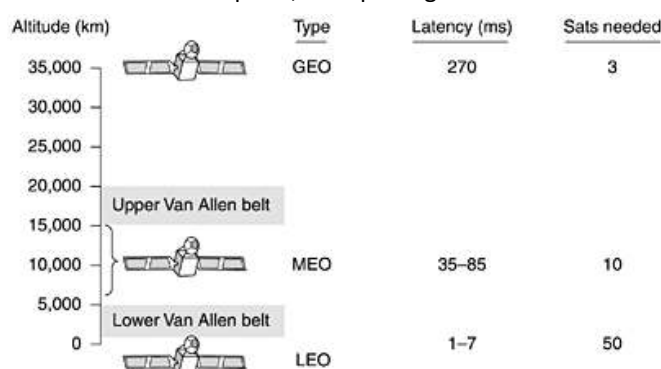
4 Satélites de comunicaciones

En la década de 1950 y principios de los '60, hubo intentos por establecer sistemas de comunicación mediante el rebote de señales sobre globos climáticos. Por desgracia, las señales se recibían eran demasiado débiles. Entonces, la Marina de EEUU desarrolló un sistema de comunicaciones por repeticiones rebotando la señal en la Luna.

Progresos posteriores tuvieron que esperar hasta que se lanzó el primer **satélite de comunicaciones**, éste tiene la ventaja (respecto a la Luna) de que puede amplificar las señales antes de enviarlas de regreso. Un satélite de comunicaciones puede considerarse como un **enorme repetidor de microondas**. Contiene números **transpondedores**, cada uno de los cuales se encarga de una parte del espectro, amplifica la señal entrante y la retransmite en otra frecuencia para evitar interferencia con la señal entrante.

De acuerdo con la ley de Kepler, el período orbital de un satélite varía según el radio de la órbita a la $3/2$ potencia. En consecuencia, los satélites con órbitas bajas desaparecen de la vista con bastante rapidez, aunque algunos de ellos son necesarios para proporcionar una cobertura continua. A una altitud de cerca de 35.800 kms, el periodo es de 24 horas.

El período de un satélite es importante, aunque no es el único punto para determinar dónde colocarlo, cualquier satélite que vuele dentro de los **cinturones de Van Allen** (capas de partículas altamente cargadas de energía, atrapadas por el campo magnético de la Tierra) sería rápidamente destruido. **Hay 3 regiones para colocar con seguridad los satélites.**



4.1 Satélites geoestacionarios

En 1945 Arthur C. Clarke calculó que un satélite a una altitud de **35.800 kms** en una órbita ecuatorial circular **aparentaría permanecer inmóvil en el cielo**, pero llegó a la conclusión de que era imposible poner en órbita amplificadores de tubos catódicos frágiles que consumían una gran cantidad de energía. La invención del **transistor** cambió las cosas, y el primer satélite Telstar fue lanzado en julio de 1962. Éstos satélites que vuelan a grandes alturas se les llama **GEO** (órbita terrestre geoestacionaria).

Con la tecnología actual, es poco aconsejable utilizar satélites geoestacionarios espaciados a menos de dos grados en el plano ecuatorial de 360 grados para evitar interferencia. Sólo puede haber 180 satélites a la vez en el cielo. Sin embargo, cada transpondedor puede utilizar múltiples frecuencias y polarizaciones para incrementar el ancho de banda disponible.

La ITU asigna la posición orbital. Este proceso tiene fuertes connotaciones políticas, y países que apenas están saliendo de la edad de piedra demandan "sus" posiciones orbitales (con el propósito de alquilarlas al mejor postor). Por si esto no fuera suficiente, las telecomunicaciones comerciales no son la única aplicación. Las compañías televisoras, los gobiernos y la milicia también quieren su tajada del pastel orbital.

Los satélites modernos pueden ser bastante grandes, pesar hasta 4000 kgs y consumir varios kilowatts de electricidad producida por paneles solares. Los satélites (por efecto de las distintas gravedades) tienden a desplazarse de sus órbitas y orientaciones asignadas, por lo que deben contrarrestar con los motores turbo integrados. Ésta actividad de ajuste se conoce como **control de la posición orbital**. Cuando se termina el combustible de los motores (10 años aprox), el satélite navega a la deriva y cae sin remedio, por lo cual es necesario desactivarlo. Con el tiempo, la órbita se deteriora y el satélite reingresa a la atmósfera y se incendia o en ocasiones se estrella contra la Tierra.

Hay discordia también por las frecuencias, la ITU ha asignado bandas de frecuencia específicas a los usuarios de satélites. Éstas son las principales.

Band	Downlink	Uplink	Bandwidth	Problems
L	1.5 GHz	1.6 GHz	15 MHz	Low bandwidth; crowded
S	1.9 GHz	2.2 GHz	70 MHz	Low bandwidth; crowded
C	4.0 GHz	6.0 GHz	500 MHz	Terrestrial interference
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Rain
Ka	20 GHz	30 GHz	3500 MHz	Rain, equipment cost

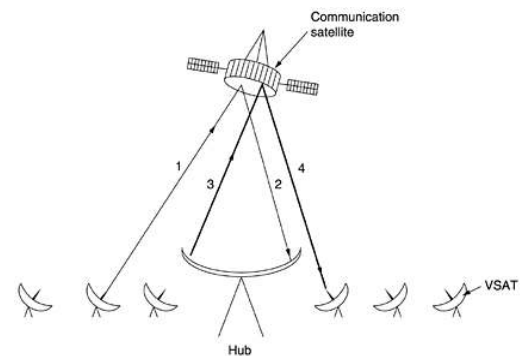
Además de estas bandas comerciales, también hay muchas bandas gubernamentales y militares.

Un satélite moderno tiene alrededor de 40 transpondedores, cada uno con un ancho de banda de 80 MHz. Algunos satélites recientes tienen capacidad de procesamiento a bordo, lo cual les permite una operación más refinada. La división de los transpondedores en canales era estática en los primeros satélites. Actualmente, cada haz del transpondedor se divide en ranuras temporales y varios usuarios se turnan para utilizarlo.

Los primeros satélites geostacionarios tenían un solo haz espacial que iluminaba cerca de un tercio de la superficie de la Tierra, al cual se le conoce como **huella**. Con la reducción de los componentes microelectrónicos (en tamaño y costo) se ha vuelto posible una estrategia de difusión mucho más refinada. Cada satélite está equipado con múltiples antenas y transpondedores. Cada haz descendente se puede concentrar en un área geográfica pequeña, de tal forma que es posible llevar a cabo simultáneamente una gran cantidad de transmisiones hacia y desde el satélite. Estos son conocidos como **haces reducidos**, tiene forma elíptica y pueden ser tan pequeños como algunos cientos de kilómetros.

Un avance reciente es el desarrollo de **microestaciones de bajo costo**, llamadas **VSATs** (terminales de apertura muy pequeña), que tienen antenas de un metro o más pequeñas y pueden producir alrededor de un watt de energía. Por lo general el enlace ascendente funciona a 19.2 kbps y el descendente a 512 kbps o más.

En muchos sistemas VSAT, las microestaciones no tienen suficiente potencia, por lo que se utiliza una **estación central** que cuenta con una antena grande para retransmitir el tráfico entre VSATs. Desventaja: acarrea un retardo más prolongado. Tienen un futuro prometedor en zonas rurales.



Los satélites tienen diversas propiedades radicalmente distintas a las de los enlaces terrestres de punto a punto: El largo viaje de ida y vuelta provoca un retardo sustancial (de 250 a 300 mseg entre extremos). Los enlaces terrestres de microondas tienen un retardo de propagación de casi 3 $\mu\text{seg/km}$, los enlaces de cable coaxial o fibra óptica 5 $\mu\text{seg/km}$. Los satélites son esencialmente medios de difusión, lo que los hace muy útiles para algunas aplicaciones. Por otro lado, son un desastre en el aspecto de seguridad y privacidad.

4.2 Satélites de Órbita Terrestre Media

Los satélites **MEO** (Órbita terrestre media) se encuentran a altitudes mucho más bajas entre los dos cinturones de Van Allen. Desde la Tierra, pareciera que se desplazan lentamente y tardan alrededor de seis horas en dar una vuelta. Es necesario rastrearlos conforme se desplazan. Tienen una huella más pequeña y se requieren transmisores menos potentes para alcanzarlos. Los 24 satélites **GPS** que orbitan a cerca de 18.000 kms son MEO.

4.3 Satélites de Órbita Terrestre Baja

LEO (Órbita terrestre baja). Debido a la rapidez de su movimiento, se requieren grandes cantidades de ellos para conformar un sistema completo. Como ventaja, las estaciones terrestres no necesitan mucha potencia, y el retardo del viaje de ida y vuelta es de tan sólo algunos milisegundos.

Iridium

Durante los primeros 30 años de la era de los satélites casi no se utilizaban los satélites de órbita baja porque aparecían y desaparecían con mucha rapidez. En 1990 Motorola solicitó permiso a la FCC para lanzar 77 satélites LEO para el proyecto Iridium. El plan fue modificado más tarde para utilizar sólo 66 satélites. El propósito era que tan pronto como un satélite se perdiera de vista, otro lo reemplazaría. Después de 7 años se lanzaron los satélites y el servicio comenzó a funcionar en noviembre de 1998. La demanda comercial de teléfonos por satélite grandes y pesados fue insignificante y el proyecto quebró en agosto de 1999. Los satélites y otros activos fueron vendidos, y el servicio se reinició en marzo de 2001.

Los satélites Iridium están a una altitud de 750 kms, en órbitas polares circulares, en forma de collar de norte a sur, con un satélite cada 32 grados de latitud. La Tierra completa se cubre con 6 collares. Cada satélite tiene un máximo de 48 celdas (haces reducidos) con un total de 1628 celdas sobre la superficie de la Tierra. Cada satélite tiene una capacidad de 3840 canales.

Globalstar

48 satélites LEO con un sistema de conmutación diferente al de Iridium que retransmite las llamadas entre satélites, lo cual requiere un equipo de conmutación complejo. Globalstar utiliza un diseño de tubo doblado tradicional, la llamada se enruta mediante estaciones terrestres, por lo que mucha de la complejidad queda en tierra.

Teledesic

Destinada a usuarios de banda ancha. La meta, ofrecer a los millones de usuarios concurrentes de Internet, un enlace ascendente de hasta 100 Mbps y un enlace descendente de hasta 720 Mbps mediante antes tipo VSAT pequeñas y fijas que ignoran por completo el sistema telefónico.

El diseño original consistía en un sistema de 288 satélites de huella pequeña, dispuestos en 12 planos justo debajo del cinturón inferior de Van Allen a 1350 Kms. Posteriormente se modifica el diseño a 30 satélites con huellas más grandes. La transmisión se realiza en la banda Ka, relativamente poco saturada y con un ancho de banda alto. Sistema de conmutación de paquetes en el que cada satélite puede enrutar hacia otros. Cuando un usuario necesita ancho de banda para enviar paquetes, tal ancho de banda se solicita y asigna de manera dinámica en alrededor de 50 mseg.

4.4 Satélites en comparación con fibra óptica

Una comparación entre comunicación por satélite y comunicación terrestre es aleccionadora. Hace 30 años se podía afirmar que el futuro de las comunicaciones estaba en los satélites. Para quienes tenían que transmitir datos, había módems de 1200 bps. Esta situación cambió radicalmente en 1984 con la entrada de la competencia en EEUU y un poco más tarde en Europa. Las compañías telefónicas comenzaron a reemplazar sus viejas redes con fibra óptica e introdujeron servicios de ancho de banda alto como ADSL. También suspendieron su añeja práctica de cargar precios artificialmente altos a los usuarios de larga distancia.

Las conexiones terrestres de fibra óptica dieron la impresión de que serían las ganadoras a largo plazo. No obstante, los satélites de comunicaciones tienen algunos nichos de mercado importantes a los cuales la fibra óptica no se dirige.

A pesar de que una fibra óptica tiene más ancho de banda potencial que los satélites, este no está disponible para la mayoría de los usuarios. La fibra que se instala actualmente en el sistema telefónico es para manejar muchas llamadas de larga distancia al mismo tiempo, no para usuarios finales. Con los satélites, es factible que un usuario instale una antena y evada por completo el sistema telefónico para conseguir un ancho de banda alto.

Un segundo nicho es el de la comunicación móvil. Los enlaces terrestres de fibra óptica no sirven para este uso. Sin embargo, es posible que una combinación de radio celular y fibra óptica funcionara para la mayoría de los casos.

Un tercer nicho es para aquellas situaciones en las cuales se requiere difusión.

Un cuarto nicho es el de las comunicaciones en lugares agrestes o con una infraestructura terrestre pobremente desarrollada. Indonesia tiene su propio satélite para el tráfico telefónico interno, para sus más de 13.667 islas.

Un quinto nicho de mercado para los satélites son las áreas donde es difícil o extremadamente costoso conseguir un derecho para el tendido de fibra óptica.

Sexto, cuando un despliegue rápido es primordial, como en una operación militar.

Al parecer la tendencia general de las comunicaciones en el futuro será la fibra óptica terrestre en combinación con radio celular, pero los satélites son mejores para algunos usos especializados. Hay un imponderable en todos los casos: el aspecto económico.

5 La red telefónica pública conmutada

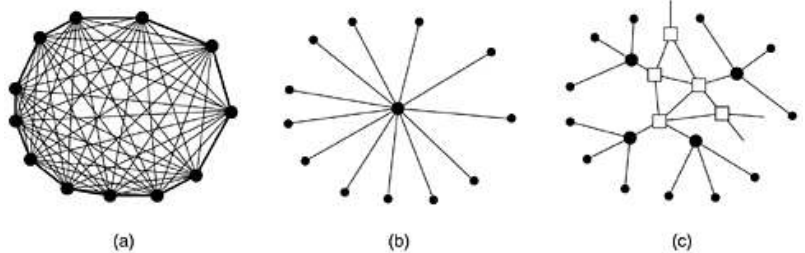
Cuando la conexión entre dos extremos no es posible de forma privada (por ejemplo mediante una LAN) se depende de las instalaciones de telecomunicaciones existentes. Por lo general, estas instalaciones, en especial la **PSTN** (Red telefónica pública

conmutada), fueron diseñadas hace muchos años. Su aplicabilidad en las comunicaciones de computadora a computadora es muy limitada, pero ésta situación está cambiando rápidamente con la introducción de la fibra óptica y la tecnología digital.

Comparamos dos conexiones entre computadoras: un cable entre 2 PCs puede transferir 10^9 bps (o más), una línea de acceso telefónico, tiene una tasa máxima de 56 kbps (20.000 veces menos). Si reemplazamos la línea telefónica por una conexión ADSL, sigue habiendo una diferencia de entre 1000-2000.

5.1 Estructura del sistema telefónico

Tan pronto como Alexander Graham Bell patentó el teléfono en 1876 hubo una gran demanda de su invento. Los teléfonos se vendían de a pares y sus usuarios debían conectarlos con un solo alambra (tipo punto a punto). Después de un año, las ciudades se cubrieron de alambres. El sistema no funcionaba. Bell formó la Bell Telephone Company la cual abrió su primera oficina de conmutación en 1878 (en Connecticut) . Colocó un alambre en la casa u oficina de cada cliente. Para realizar una llamada, el cliente debía dar vueltas a una manivela para producir un sonido que llamara la atención del operador que lo conectaba manualmente con el receptor por medio de un cable puenteador. Muy pronto surgieron varias oficinas de conmutación del Bell System y la gente quiso hacer llamadas de larga distancia, de modo que se empezaron a interconectar las oficinas de conmutación. Pronto, conectar cada oficina de conmutación con las demás no era práctico, por lo que se crearon las oficinas de conmutación de segundo nivel. Y así sucesivamente hasta llegar a 5 niveles.

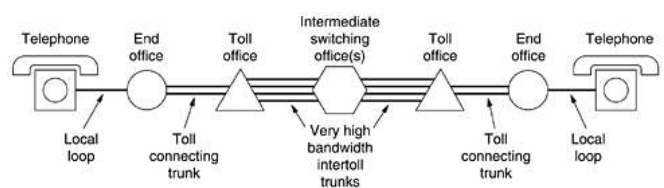


Para 1890 las tres partes principales del sistema telefónico ya estaban en su lugar, las oficinas de conmutación, los cables a los clientes y el cableado entre oficinas de conmutación. Aunque se han realizado mejoras, el modelo básico ha permanecido intacto por más de 100 años.

Previo a la división de AT&T en 1984, el sistema telefónico EEUU fue organizado como una jerarquía de múltiples niveles, con alta redundancia. A pesar de su simplicidad... cada teléfono tiene 2 alambres de cobre que van hasta la oficina central local (de 1 a 10 kms). Tan sólo en EEUU existen cerca de 22.000 oficinas centrales. Las conexiones de dos alambres entre el teléfono de cada suscriptor y la oficina central se conoce como circuito local. En cierto momento el 80% del capital de AT&T fue el cobre en esos circuitos locales. De hecho, era la mina de cobre más grande del mundo.

Si un suscriptor conectado a una oficina central llama a otro de la misma central, el mecanismo de conmutación dentro de la oficina establece una conexión eléctrica entre los dos circuitos locales y permanece intacta durante toda la llamada.

Si el teléfono al que se llama está en otra central... cada oficina central tiene varias líneas salientes a uno o más centros de conmutación cercanos, llamados **oficinas interurbanas**. Estas líneas se llaman **troncales de conexión interurbanas**. Si entre los dos centros existe un troncal interurbano, la conexión se puede establecer dentro de la oficina interurbana. Si no, la trayectoria se deberá establecer en un nivel más alto de la jerarquía. Hay oficinas, primarias, seccionales y regionales que forman una red que conecta a las oficinas interurbanas. Las centrales se comunican entre sí mediante **troncales interurbanas** de gran ancho de banda.



Para telecomunicaciones se usan diversos medios de transmisión. Los circuitos locales son pares trenzados. Entre las oficinas de conmutación se usan ampliamente cables coaxiales, microondas y, en especial, fibra óptica. Actualmente todas las troncales y los conmutadores son digitales, y el circuito local es el único elemento analógico.

El sistema telefónico tiene, entonces, 3 componentes principales:

1. Circuitos locales (cables de par trenzado)
2. Troncales (fibra óptica digital)
3. Oficinal de conmutación

5.2 La política de los teléfonos

En ésta sección el texto explica como se desmonopolizó el servicio telefónico de EEUU.

5.3 El circuito local: módems, ADSL e inalámbrico

Una oficina central tiene hasta 10.000 circuitos locales (también conocido como “última milla”). Durante más de 100 años este circuito ha utilizado señalización analógica y es probable que siga así, debido al costo elevado de la conversión a digital. Por lo tanto, cuando una computadora desea enviar datos digitales sobre una línea analógica de acceso telefónico, es necesario convertir primero los datos a formato analógico para transmitirlos. El módem realiza esta conversión. Los datos se convierten a formato digital en la oficina central de la compañía telefónica para transmitirlos sobre las troncales que abarcan largas distancias. Si en el otro extremo hay una computadora con un módem hay que hacer la conversión inversa para recorrer el circuito local en destino.

La señalización analógica consiste en la variación del voltaje con el tiempo para representar un flujo de información. Los medios de transmisión no son perfectos, por lo tanto el receptor no recibe exactamente lo enviado por el transmisor, y si los datos son digitales, estas diferencias pueden conducir a errores. Las líneas de transmisión tienen tres problemas principales:

- Atenuación: pérdida de energía conforme la señal se propaga hacia su destino.
- Distorsión por retardo: los diferentes componentes de Fourier se propagan a diferente velocidad por el cable, esta diferencia genera distorsión.
- Ruido: energía no deseada de fuentes distintas al transmisor. El ruido térmico causado con el movimiento de electrones en el cable es inevitable. La diafonía (otro tipo de ruido) se debe al acoplamiento inductivo entre dos cables cercanos. El ruido de impulso es causado por picos en la línea de suministro de energía.

Módems

Debido a problemas como la atenuación y la velocidad de propagación dependen de la frecuencia, es indeseable tener un rango amplio de frecuencias en la señal. Desgraciadamente, las ondas cuadradas, tienen un espectro amplio por lo que están sujetas a una fuerte atenuación y a distorsión por retardo. Estos efectos hacen que la señalización de banda base (CC, corriente continua) sea inadecuada, excepto a velocidades bajas y distancias cortas.

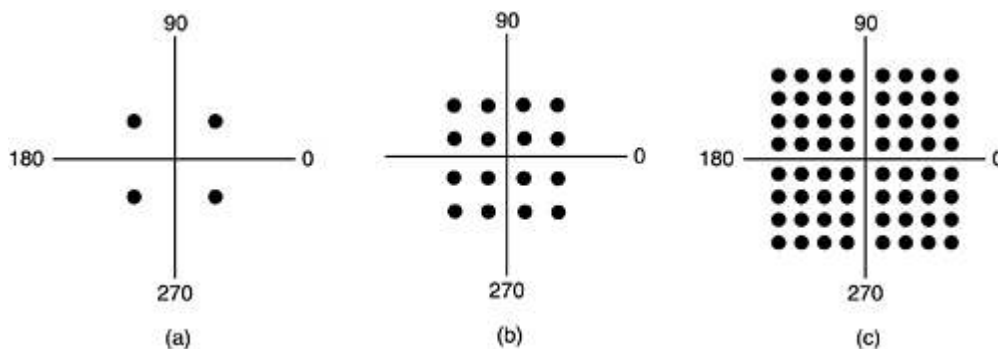
La señalización de CA (corriente alterna) se utiliza para superar los problemas de CC introduciendo un tono continuo en el rango de 1000 a 2000 Hz llamado **portadora de onda senoidal**, cuya amplitud, frecuencia o fase se pueden modular para transmitir la información. En la **modulación de amplitud** se usan dos niveles diferentes de amplitud para representar 0 y 1. En la **modulación de frecuencia** (o “por desplazamiento de frecuencia”) se usan dos o más tonos diferentes. La forma más simple, la **modulación de fase**, la onda portadora se desaza 0 o 180 grados a intervalos espaciados de manera uniforme. Un mejor esquema es utilizar desplazamientos de 45, 135, 225 o 315 grados para transmitir 2 bits de información por intervalo.

Un módem acepta un flujo de bits como entrada y produce una portadora modulada. Para alcanzar velocidades más altas, no basta sólo incrementar la velocidad de muestreo. Según Nyquist no es posible muestrear más allá de 6000 Hz sobre una línea telefónica perfecta. La mayoría de los módems muestrea 2400 veces por segundo, el objetivo es conseguir más bits por muestra (**baudios**). Se envía un **símbolo** durante cada baudio. Si se utilizan dos voltajes (0 y 1), la tasa de bits es de 2400 bps, pero si se utilizan los voltajes 0,1,2 y 3, cada símbolo consta de 2 bits, por lo que una línea de 2400 baudios transmite 2400 símbolos por segundo a una tasa de 4800 bps. De manera similar con cuatro posibles desplazamientos de fase también hay 2 bits por símbolo (QPSK – Codificación por desplazamiento de fase en cuadratura).

El **ancho de banda** de un medio es el **rango de frecuencias** que atraviesa al medio con atenuación mínima. Es una propiedad física del medio y se mide en hertzios (Hz). La **tasa de baudios** es la cantidad de **muestras por segundo** que se realizan. Cada muestra envía un símbolo, por lo tanto tasa de baudios y **tasa de símbolos es lo mismo**. La **técnica de modulación determina** la cantidad de **bits por símbolo**. La **tasa de bits** es igual a la cantidad de **símbolos por segundo** por la **cantidad de bits por símbolo**.

Los módems utilizan una combinación de técnicas de modulación.

La fase de un punto la indica el ángulo que se forma con el eje de las X al trazar una línea desde el punto hacia el origen.



En (a) tenemos cuatro combinaciones (45, 135, 225 y 315 grados) y se pueden utilizar para transmitir 2 bits por símbolos, es **QPSK**. En (b) 16 combinaciones diferentes permite transmitir 4 bits por símbolo y es **QAM-16** (Modulación de Amplitud en Cuadratura). Otro esquema (c) de modulación en amplitud y fase, permite transmitir 6 bits por símbolo, es **QAM-64**.

Los diagramas más densos son más sensibles al ruido ya que un mínimo ruido puede dar como resultado errores y muchos bits malos. Para reducir éstos errores se realizan correcciones mediante la incorporación de bits adicionales en cada muestra. Los esquemas se conocen como **TCM** (Modulación por Codificación de Malla). Por ejemplo, el estándar **V.32** de módem utiliza 32 puntos de constelación para transmitir 4 bits de datos y 1 bit de paridad, lo que permite alcanzar **9600 bps sobre 2400 baudios**.

Estándar	Bits de Datos	BPS
V.32	4	9.600
V.32 bis	6	14.400
V.34	12	28.800
V.34 bis	14	33.600

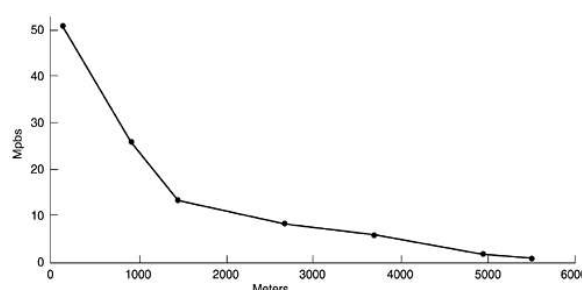
El siguiente escalón es **V.32 bis** transmite 6 bits de datos y 1 de paridad a 2400 baudios, utilizando **QAM-128**, con lo cual alcanza **14.400 bps**. El **V.34** corre a **28.800 bps** con 12 bits por símbolo, y el **V.34 bis** alcanza **33.600 bps** transfiriendo **14 bits** por símbolo. Para alcanzar tasas de datos mayores a 33.600 se pueden utilizar técnicas de compresión antes de la transmisión. En todos los casos, los módems prueban la calidad de la línea, y determinan la velocidad de transmisión. Llegan hasta 33.600 bps por el **límite de Shannon** de aproximadamente 35 Kbps en el sistema telefónico. Este límite se da por la longitud y calidad de los circuitos locales.

La razón por la cual se utilizan los módems de 56 Kbps se relaciona con el teorema de **Nyquist**. El canal telefónico tiene un ancho de banda de 4000 Hz, la cantidad de muestras independientes por segundo es de 8000. La cantidad de bits es de 8, con uno para control, lo cual permite los 56.000 bps. En Europa se utilizan los 8 bits para el usuario lo cual permitía 64.000 bps. Éste estándar es el **V.90** que hace posible un canal ascendente de 33.6 Kbps y un canal descendente de 56 Kbps. El paso siguiente fue el **V.92** que tienen capacidad para 48 Kbps en el canal ascendente.

Los módems que transmiten tráfico en ambas direcciones de manera simultánea se conocen como **dúplex total**. En cambio se permite tráfico en ambas direcciones pero de a uno por vez es **semidúplex**. Finalmente si el tráfico es posible en una sola dirección estamos ante un **síplex** (por ejemplo una fibra óptica con un láser en un extremo y un detector de luz en el otro).

Líneas digitales de suscriptor (xDSL)

En un principio aparecieron varias ofertas por parte de las compañías de éste tipo de servicio por eso hay diversos "x" de la forma xDSL. El más popular hoy es **ADSL** (DSL Asimétrica). La razón por la cual los módems tradicionales son lentos es porque las líneas fueron creadas para transportar voz humana y los datos han sido siempre un aspecto secundario, por lo tanto el sistema siempre se optimizó para lo primero. Del lado de la central, para cada circuito se aplica un filtro que atenúa debajo de 300 Hz y sobre 3400 Hz, restringiendo el ancho de banda a 4000 Hz. Cuando el cliente se suscribe a un servicio xDSL la línea se conecta a otro conmutador sin filtro y el limitante pasa a ser el medio físico local y no el filtro. La capacidad del circuito local depende de varios factores, suponiendo que algunos de ellos son óptimos (antigüedad del cableado, haces moderados, etc.), se presenta una gráfica del ancho de banda potencial en función de la distancia.



Todos los servicios xDSL se diseñaron para que: funcionaran **sobre los circuitos locales** existentes **sin afectar teléfonos ni faxes** existentes **superando** por mucho los **56 Kbps** y con una **tarifa mensual plana**, no por minuto.

El primer servicio ADSL funcionaba dividiendo el espectro del circuito local (alrededor de 1.1 MHz) en tres bandas: POTS (Servicio telefónico convencional), canal ascendente y canal descendente. Esta técnica se conoce como **multiplexión por división de frecuencia**. El enfoque alternativo el **DMT (Multitono discreto)** divide el espectro en **256 canales** independientes. El **canal 0** se utiliza para **POTS**, del **1-5 libres** para evitar interferencias, un canal para **control del flujo ascendente**, uno para el control del **flujo descendente** y el resto (**248 canales**) para **datos** del usuario. Las armónicas, la diafonía y otros efectos hacen que en la práctica no se lleguen a los rendimientos teóricos. La mayoría de los proveedores asigna entre el 80% y el 90% del ancho de banda al canal descendente (por ello A de Asimétrico). Una división común es asignar **32 canales para el ascendente** y el resto para el descendente.

El estándar ADSL permite **velocidades de hasta 8 Mbps para el descendente** y 1 Mbps para el ascendente, no obstante pocos proveedores ofrecen esta velocidad. Actualmente se **utiliza QAM** con un máximo de **15 bits por baudio** lo que permite con 224 canales descendentes a 4000 baudios, un **ancho de banda teórico de 13.44 Mbps**. La relación señal a ruido nunca es suficientemente buena como para lograr ese ancho de banda, pero en trayectorias cortas sobre circuitos de alta calidad es posible alcanzar los 8 Mbps. El módem ADSL es un procesador de señales digitales configurado para funcionar como 250 módems QAM.

En la oficina central, se instala un divisor que filtra la porción de señal correspondiente a la voz (y la envía al conmutador convencional) y los datos se enrutan hacia el **DSLAM (Multiplexor de Acceso de Línea Digital de Suscriptor)**. Allí se elaboran paquetes y se envían al ISP.

La desventaja viene dada porque en la residencia del cliente debe instalarse un **NID** (Dispositivo de Interfaz de Red) y un divisor, lo cual debe ser realizado por un técnico, lo cual resulta. Un diseño alternativo está dado por la utilización de un microfiltro (G.lite – estándar ITU G.922.2) que se instala para dividir las frecuencias que van para el teléfono convencional y las que van al módem ADSL. Este sistema no es tan confiable como el de divisor lo que sólo se puede utilizar hasta 1.5 Mbps.

Circuitos locales inalámbricos

El WLL (Circuito local inalámbrico) es una alternativa de bajo costo en lugar del tradicional circuito local con cable de par trenzado. Funciona con una gran antena direccional en el techo del cliente. Comenzó en 1998. Funciona por microondas de entre 10 y 12 cms de longitud con un rango de 50 km, pudiendo penetrar vegetación y lluvia moderadamente bien. Fue puesto en uso en un servicio denominado **MMDS** (Servicio de Distribución Multipunto y Multicanal). La gran ventaja es que la tecnología está bien desarrollada y el equipo se consigue con facilidad. Desventaja: el ancho de banda es modesto y debe ser compartido. Este ancho de banda bajo motivó el interés en las ondas milimétricas por el cual se desarrolló el servicio **LMDS** (Servicio local de Distribución Multipunto). Este servicio utiliza torres con varias antenas apuntando en direcciones distintas. Tienen un rango de 2-5 km. Se necesitan muchas antenas para abracar una ciudad. Tiene ancho de banda asimétrico con prioridad en el canal descendente. Cada sector puede contar con 36 Gbps de flujo descendente y 1 Mbps de flujo ascendente. Cada sector permite un máximo de 18.000 usuarios activos (9.000 para un retardo razonable). Problemas: las ondas milimétricas se propagan en línea recta, se necesita una línea visual despejada entre techo y torre, no puede haber árboles entre medio. La lluvia también absorbe las ondas, aunque hasta cierto punto, se pueden compensar con códigos de corrección de errores.

5.4 Troncales de multiplexión

Cuesta lo mismo instalar y mantener un troncal de bajo ancho de banda que uno de alto ancho de banda, el gasto principal es la excavación de zanjas. Las compañías telefónicas han desarrollado esquemas complejos para multiplexar muchas conversaciones una sola troncal física. Existen dos categorías principales:

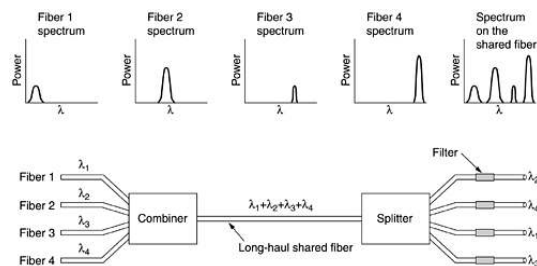
Multiplexión por división de frecuencia (FDM)

Los filtros limitan el ancho de banda utilizable a cerca de 3000 Hz por canal de calidad de voz. Cuando se multiplexan muchos canales, se asignan 4000 Hz por canal para mantenerlos separados. Se eleva la frecuencia de los canales de voz, cada uno en una cantidad diferente, después se pueden combinar. Existe una superposición mínima entre canales adyacentes por cual un pico fuerte en el borde de un canal se detectará en el adyacente como ruido no térmico.

Los esquemas FDM están normalizados hasta cierto punto. Un estándar muy difundido es el de 12 canales a 4000 Hz dentro de la banda de 60 a 108 KHz. Esta unidad se llama **grupo**. La banda de 12 a 69 kHz a veces se usa para otro grupo. Se pueden multiplexar cinco grupos (60 canales) formando un **supergrupo**. La siguiente unidad es el **grupo maestro** compuesto por 5 (estándar CCIT) o 10 (sistema Bell) supergrupos. Existen otros estándares que llegan hasta 230.000 canales de voz.

Multiplexión por división de longitud de onda (WDM)

Para los canales de fibra óptica se utiliza una variante de FDM llamada **WDM** (Multiplexión por división de longitud de onda). Los haces de luz se combinan en una sola fibra compartida. La única diferencia con respecto a la FDM eléctrica es que un sistema óptico utiliza una rejilla de difracción que es totalmente pasivo y por lo tanto, confiable.



Fue inventada en 1990. Los primeros sistemas comerciales tenían ocho canales a 2.5 Gbps cada uno. En 1998 40 canales. En 2001 96 canales a 10 Gbps. Los sistemas con 200 canales ya están en desarrollo. Cuando el número de canales es muy grande y las longitudes de onda están espaciadas entre sí de manera estrecha (ej. a 0.1 nm) estamos ante **DWDM** (WDM densa).

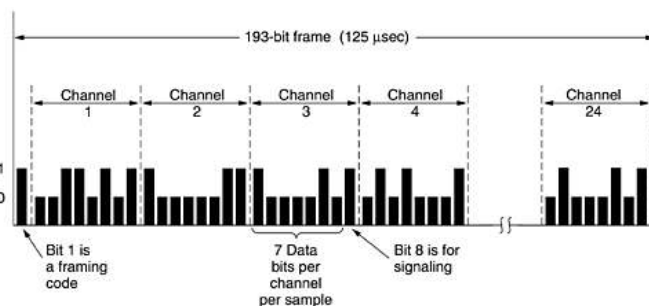
Teóricamente hay espacio para 2500 canales de 10 Gbps.

Otro desarrollo novedoso es que mediante amplificadores ópticos se puede regenerar toda la señal una vez cada 1000 km sin necesidad de múltiples conversiones óptico-eléctricas.

Es posible construir sistemas WDM conmutados como el de la figura.

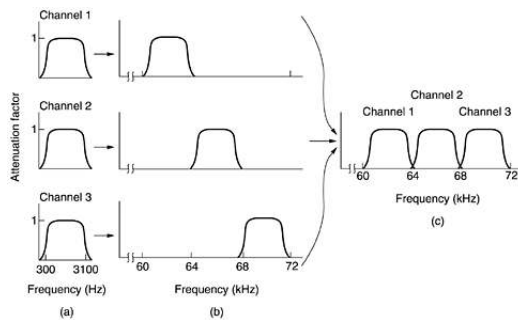
Multiplexión por división de tiempo (TDM)

FDM requiere circuitos analógicos y WDM fibra óptica, pero aún hay mucho cable de cobre en el sistema telefónico. TDM puede manejarse por completo mediante dispositivos digitales y a ello se debe su popularidad. Desgraciadamente, sólo se puede utilizar para datos digitales. Se necesita una conversión de analógico a digital en la oficina central, en donde todos los circuitos locales individuales se junta para combinarse en troncales. Las múltiples señales de voz se digitalizan y combinan en una sola troncal digital saliente, mediante un códec. El códec toma 8000 muestras por segundo (125 μseg/muestra por el teorema de Nyquist) suficiente para un ancho de banda de 4 kHz (el del canal telefónico). Esta técnica se llama **PCM** (modulación por codificación de impulsos) y es el corazón del sistema telefónico moderno.



No existe un estándar internacional respecto a PCM, por lo tanto hay esquemas incompatibles en diferentes países alrededor del mundo. En EEUU y Japón es la portadora T1 que consiste en 24 canales de voz que se multiplexan juntos. Cada uno de los canales inserta 8 bits en el flujo de salida (7 de datos y uno de control). Una trama consiste en $24 \times 8 = 192$ bits más un bit extra para entramado, totalizando 193 bits cada 125 μseg, lo que produce una tasa de transmisión bruta de 1.544 Mbps. El bit número 193 se usa para sincronización y sigue el patrón 01010101... El receptor verifica de manera continua este bit. Cuando se utiliza un sistema T1 exclusivamente para datos, se utilizan 23 canales para datos y el 24 un patrón especial de sincronización que permite la recuperación rápida en caso de que la trama pierda sincronía.

Cuando el CCITT llegó a un acuerdo para estandarizar, sintió que 8000 bps para señalar era demasiado. Surgieron dos variantes (incompatibles), la **señalización por canal común**, tiene un bit extra en las tramas pares y contiene información de señalización para todos los canales de las tramas pares. La **señalización por canal asociado** tiene su propio subcanal privado de señalización, asignando uno de los ocho bits de usuario de cada sexta trama a funciones de señalización, así que cinco de cada seis muestras tienen 8 bits de ancho y la otra sólo tiene 8. El CCITT también recomendó una portadora PCM a 2.048 Mbps llamada **E1**. Esta empaqueta 32 muestras de datos de 8 bits. 30 canales se usan para información y dos para señalización. Cada grupo de cuatro



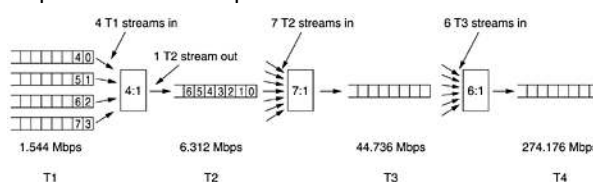
tramas proporciona 64 bits de señalización, la mitad de los cuales se usa para señalización por canal asociado y el resto se usa para sincronización de tramas o se reserva para que cada país los use como quiera. Fuera de EEUU y Japón se utiliza E1.

Una vez que la señal de voz se digitaliza, es tentador tratar de aplicar técnicas estadísticas para reducir la cantidad de bits necesarios por canal. Estas técnicas no sólo son apropiadas para codificar la voz, sino también para digitalizar cualquier señal analógica. Todos los métodos de compactación se basan en el principio de que la señal cambia con relativa lentitud en comparación con la frecuencia de muestreo, de modo que mucha de la información digital de 7 u 8 bits es redundante.

Un método llamado **modulación diferencial por codificación de impulsos** consiste en transmitir la diferencia entre su valor actual y el valor previo. Puesto que los saltos de ± 16 en una escala de 128 no son probables, podrían bastar 5 bits en lugar de 7. Una variante de éste método es el de la **modulación delta** que requiere que cada valor muestreado difiera de su predecesor en $+1$ o -1 . Bajo éstas condiciones se transmite un solo bit. Si la señal cambia con rapidez se pierde información.

Una mejora consiste en extrapolar algunos valores previos para predecir el siguiente valor y codificar a continuación la diferencia entre la señal real y la que se predijo. Emisor y receptor deben utilizar el mismo algoritmo de predicción. Se conoce como **codificación por predicción**.

La multiplexación por división de tiempo permite que se multiplexen varias portadoras T1 en portadoras de orden más alto. Se pueden multiplexar cuatro canales T1 en un canal T2. La multiplexación en T2 y superiores se hace bit por bit en lugar de byte por byte. T2 es de 6.312 Mbps (4 T1 deberían generar 6.176 Mbps), los bits adicionales sirven para entamar y para recuperar en caso de que la portadora pierda sincronía. T1 y T3 son utilizados ampliamente por los clientes, mientras que T2 y T4 sólo se utilizan en el sistema telefónico. Siete flujos T2 se combinan para formar un flujo T3. Seis flujos T3 forman un flujo T4. En cada paso se agrega una pequeña sobrecarga para entramado y recuperación.



SONET/SDH

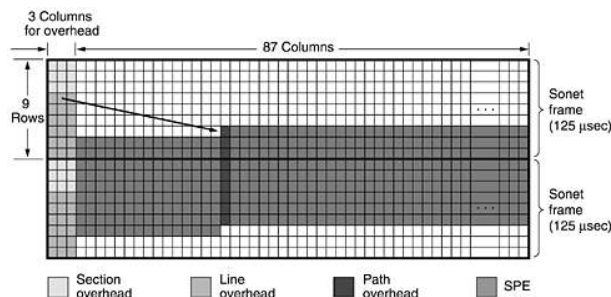
En 1985 Bellcore empezó a trabajar en un estándar llamado **SONET** (Red Óptica Síncrona). Más tarde el CCITT se unió al esfuerzo y produjo un conjunto de recomendaciones paralelas (G.707, G.708 y G.709) a las que se las llama **SDH** (Jerarquía Digital Síncrona). Difieren sólo en detalles menores. El tráfico telefónico de larga distancia de EEUU y una buena parte del mismo en los demás países tiene troncales con SONET en la capa física.

Los cuatro objetivos principales de SONET fueron:

1. Hacer posible la **interconexión de diferentes operadores telefónicos**, lo cual requirió un estándar de señalización – longitud de onda, temporización, estructura de entramado, etc.-
2. **Unificar los sistemas digitales** estadounidense, europeo y japonés, que se basaban en variantes del PCM de 64 Kbps.
3. Proporcionar un **mecanismo para multiplexar** varios canales digitales. En el momento en que se creó SONET se usaba T3 ampliamente. La T4 estaba definida pero no era muy usada todavía.
4. Tenía que **proporcionar apoyo** para las operaciones, administración y mantenimiento (OAM).

Una decisión temprana fue convertir a SONET en un sistema TDM tradicional, por lo tanto es controlado por un reloj maestro con una precisión de alrededor de 1 parte en 10^9 . Los bits se envían a intervalos de suma precisión, emisor y remitente están atados a un reloj común.

La **trama básica** de SONET es un bloque de **810 bytes** que se emite cada 125 μ seg, haya o no datos útiles para enviar. La velocidad de **8000 tramas/seg** coincide perfectamente con la tasa de muestreo de los canales PCM. Las tramas se pueden describir como un rectángulo de bytes de 90 columnas de ancho por 9 filas de alto. 6480 bits (8×810) se transmiten 8000 veces por segundo lo que da una tasa de datos bruta de 51.84 Mbps. Éste es el canal básico de SONET y se llama **STS-1** (señal síncrona de transporte 1). Las primeras tres columnas de cada trama se reservan para información de administración del sistema, las primeras tres filas contienen el encabezado de sección y las siguientes seis el encabezado de línea.



Un transmisor SONET envía tramas consecutivas sin hueco entre ellas. Lo que ve el receptor es un flujo continuo... ¿cómo sabe dónde comienza la trama? Los dos primeros bytes de cada trama contienen un patrón fijo que el receptor busca. En teoría, un usuario puede insertar ese patrón en la carga útil, pero no es posible hacer esto debido al multiplexado de múltiples usuarios que se realiza en la misma trama, entre otras razones.

Las 87 columnas restantes (50.112 Mbps) son datos de usuario. Sin embargo, los datos de usuario o **SPE** (Contenedor de carga útil síncrona) puede empezar en cualquier parte dentro de la trama. La facultad de que la SPE empiece en cualquier lugar o incluso abarque dos tramas confiere una flexibilidad adicional. Si una carga útil llega a la fuente mientras se está construyendo una trama ficticia, se puede insertar en la trama actual en lugar de retenerla hasta el inicio de la siguiente.

SONET		SDH	Data rate (Mbps)		
Electrical	Optical	Optical	Gross	SPE	User
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344	594.432
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688	1188.864
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032	1783.296
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728
STS-192	OC-192	STM-64	9953.28	9621.504	9510.912

5.5 Conmutación

Podemos dividir al sistema telefónico en dos partes: planta externa y planta interna. Solo hemos visto la externa. Vemos ahora la interna. En la actualidad se utilizan dos técnicas de conmutación diferentes: conmutación de circuitos y conmutación de paquetes.

Conmutación de circuitos

Cuando una llamada pasa por una oficina de conmutación se establece una conexión física (en forma conceptual) entre la línea por la que llegó la llamada y una de las líneas de salida. En los primeros días del teléfono, se establecía la conexión cuando el operador puenteaba los enchufes de entrada y salida. El equipo de conmutación automática fue inventado por Almon B. Strowger. Hoy en día, la trayectoria entre dos teléfonos pueden hacerse, aparte de "sobre el cobre", sobre otras tecnologías, como microondas, en los cuales se multiplexan miles de llamadas. Sin embargo, la idea básica es válida: una vez establecida la llamada existe una **trayectoria dedicada entre ambos extremos** y existirá **hasta que finalice la llamada**.

Conmutación de mensajes

Esta forma no establece por adelantado una trayectoria, en cambio, cuando el emisor tiene un bloque de datos para enviar, éste se almacena en la primera oficina de conmutación (enrutador) y después se reenvía. Cada bloque se recibe en su totalidad, se inspecciona en busca de errores y se retransmite. Una red que utiliza ésta técnica se denomina red de **almacenamiento y reenvío** (*store and forward*).

Los primeros sistemas de telecomunicación electromecánicos usaban conmutación de mensajes para enviar telegramas. Actualmente ya no se utiliza.

Conmutación de paquetes

Los paquetes individuales se envían conforme se necesite y **no se les asigna por adelantado ninguna trayectoria**. Ningún usuario puede monopolizar una línea de transmisión durante mucho tiempo ya que se establece un **límite superior de tamaño de bloque**. Difiere de la conmutación de circuitos en varios aspectos, no se requiere establecer un circuito para enviar un paquete; simplemente se envía tan pronto como esté disponible. Como no hay trayectoria, **diferentes paquetes pueden seguir trayectorias distintas** y llegar en **desorden**. Es más tolerante a fallas, **los paquetes pueden enrutarse por vías alternativas**. Como no se reserva ancho de banda, los **paquetes podrían tener que esperar** su turno para ser reenviados, pero **no desperdicia ancho de banda**. La técnica de **almacenamiento y reenvío agrega retardo**. El tiempo de conexión no es un problema, pero con frecuencia el volumen de tráfico si lo es.

Elemento	Conm. de Circuitos	Conm. de Paquetes
Establecimiento de llamada	Requerido	No necesario
Trayectoria física detallada	Si	No
Cada paquete sigue la misma trayectoria	Si	No
Los paquetes llegan en orden	Si	No
Una falla de conmutación es fatal	Si	No
Ancho de banda disponible	Fijo	Dinámico
¿Cuándo puede haber congestión?	Al establecer la comunicación	En cada paquete
Ancho de banda potencial desperdiciado	Si	No
Almacenamiento y reenvío	No	Si
Transparencia	Si	No
Cargos	Por minuto	Por paquete

6 El sistema telefónico móvil

Los teléfonos móviles han pasado por tres generaciones con tecnologías diferentes: Voz analógica, voz digital y voz y datos digitales. El primer sistema móvil fue diseñado en EEUU por AT&T. Un solo sistema analógico permitía que un teléfono celular funcionara en todo el país. En contraste cuando el sistema móvil apareció en Europa cada país diseñó su propio sistema. Europa aprendió de su error y cuando aparecieron los sistemas digitales estandarizaron un solo sistema: GSM. En cambio EEUU decidió que el gobierno no debería participar de la estandarización y como consecuencia tiene funcionando dos principales sistemas telefónicos móviles digitales incompatibles.

6.1 Primera generación: voz analógica

El sistema más antiguo consistió en radiotelefonos móviles para comunicación marítima y militar. En 1946, el primer sistema de teléfonos instalado en auto se construyó en St. Louis. Se utilizaba un solo transmisor grande colocado en la parte superior de un edificio y tenía un solo canal. Había que oprimir un botón para hablar (PTT – Push to talk). El radio de banda civil (CB) se sigue utilizando en taxis.

En los '60 se instaló el **IMTS** (Sistema mejorado de telefonía móvil) que utilizaba un transmisor de alta potencia (200 watts) en la cima de una colina pero tenía dos frecuencias, una para enviar y otra para recibir. Los usuarios móviles no podían escucharse unos a otros. IMTS manejaba 23 canales dispersos desde 150 hasta 450 MHz. A veces los usuarios tenían que esperar mucho tiempo hasta obtener todo de marcar. El sistema no era práctico debido a sus limitaciones.

Sistema avanzado de telefonía móvil (AMPS)

En 1982 se instaló en EEUU el **AMPS** inventado por los Laboratorios Bell. También se utilizó en Inglaterra (donde se llamó TACS) y en Japón (MCS-L1). Muchas de sus propiedades fundamentales han sido heredadas por su sucesor digital, D-AMPS, con el fin de tener compatibilidad hacia atrás.

En todos los sistemas de telefonía móvil, una región geográfica se divide en celdas. En AMPS son de entre 10 y 20 km de diámetro; en los sistemas digitales, las celdas son más pequeñas. Cada celda utiliza un conjunto de frecuencias que no es utilizada por ninguno de sus vecinos, lo que confiere más capacidad que los sistemas anteriores al reutilizar frecuencias cercanas pero no adyacentes. Al mismo tiempo ofrece buena separación de frecuencias y baja interferencia. Por otro lado, al ser las celdas más pequeñas se necesita menor potencia, lo cual conduce a dispositivos más pequeños y económicos.

Encontrar localidades elevadas para colocar antenas es un problema. En un área en la que la cantidad de usuarios ha crecido mucho se reduce la potencia y las celdas sobrecargadas se dividen en microceldas para permitir una mayor reutilización de las frecuencias. Algunas veces se crean microceldas temporales utilizando torres portables en eventos públicos masivos (conciertos, partidos, etc.).

En el centro de la celda está la estación base que consiste en una computadora y un transmisor/receptor conectado a una antena. En un sistema pequeño, todas las estaciones bases se conectan a un mismo dispositivo llamado MTSO (Oficina de conmutación de telefonía móvil) o MSC (Centro de conmutación móvil), sino varias MTSOs se conectan a una MTSO de segundo nivel, y sucesivos. Las MTSOs se comunican también con otras MTSOs y con la PSTN mediante una red de conmutación de paquetes.

Cuando un teléfono móvil sale de una celda, la estación base consulta a las adyacentes si recibe la señal del teléfono. Se informa al teléfono cual va a ser su nueva frecuencia y se produce el salto. Este proceso se llama **transferencia de celda** (cell handoff) y tarda 300 mseg. Se puede realizar de dos maneras:

- **Soft handoff** el teléfono es adquirido por la nueva estación base antes de que pierda señal de la estación original. El teléfono debe ser capaz de sintonizar dos frecuencias al mismo tiempo (los de primera y segunda generación no pueden).
- **Hard handoff** la antigua estación base deja el teléfono antes de que la nueva lo adquiera. Si la nueva no lo logra, la llamada se termina de manera abrupta.

Canales

El sistema AMPS emplea 832 canales dúplex, compuesto por 832 canales simplex desde 824 hasta 849 MHz y 832 canales de recepción desde 869 hasta 894 MHz. Cada canal simplex tiene 30 kHz de ancho. Los canales se separan con FDM. Las ondas de radio tienen cerca de 40 cm de largo y viajan en línea recta. Son absorbidas por la vegetación y rebotan en suelo y edificios.

Los 832 canales se dividen en 4 categorías:

- Control (base a móvil) para administrar el sistema.
- Localización (base a móvil) para avisar a usuarios móviles que tienen llamadas.
- Acceso (bidireccional) para establecimiento de llamadas y asignación de canales.
- Datos (bidireccional) para voz, fax o datos.

21 canales se reservan para control. Puesto que las mismas frecuencias no pueden reutilizarse en celdas cercanas, la cantidad real de canales de voz por celda es de aproximadamente 45.

Administración de llamadas

Cada teléfono móvil en AMPS tiene un número de serie de 32 bits y un número telefónico de 10 dígitos en su PROM. Cuando un teléfono se enciende examina la lista preprogramada de 21 canales de control para encontrar la señal más potente; luego difunde su número de serie y el telefónico varias veces. La estación base avisa a la MTSO la cual registra la existencia de un nuevo cliente. El teléfono móvil vuelve a registrarse cada 15 minutos.

Para hacer una llamada el teléfono envía el número al que se va a llamar y su propia identidad por el canal de acceso. Si ocurre una colisión lo intenta nuevamente más tarde. Cuando la estación base recibe la petición informa a la MTSO, la cual busca un canal desocupado para la llamada; si encuentra uno, el número de canal se envía de regreso por el canal de control.

Las llamadas entrantes funcionan de forma diferente. Los teléfonos desocupados escuchan continuamente el canal de aviso para detectar mensajes dirigidos a ellos. Cuando se hace una llamada se envía un paquete a la MTSO local del destinatario de la llamada para averiguar dónde se encuentra. Luego se envía un paquete a la estación base de la celda donde está el destinatario, la cual realiza una difusión por el canal de aviso, el teléfono responde afirmativamente por el canal de control para tomar la llamada. La base informa porque canal va a entrar la llamada y el teléfono conmuta a ese canal para empezar a timbrar.

6.2 Teléfonos móviles de segunda generación: voz digital

Carece de estandarización. Hay cuatro sistemas en uso: D-AMPS, GSM, CDMA y PDC. PDC se utiliza sólo en Japón y es básicamente un D-AMPS modificado para obtener compatibilidad hacia atrás con el sistema analógico.

D-AMPS El sistema avanzado de telefonía móvil digital

Es completamente digital. Se describe en estándar internacional IS-54 y su sucesor IS-136. Se diseñó con mucho cuidado para que pudiera coexistir con AMPS a fin de que los teléfonos de primera generación pudieran funcionar de manera simultánea en la misma celda. La MTSO de la celda determina cuáles canales son analógicos y cuáles digitales, y puede cambiar el tipo de manera dinámica conforme cambie la mezcla de canales en una celda.

Cuando D-AMPS fue introducido se puso disponible una nueva banda de frecuencia para manejar carga esperada creciente. Los canales ascendentes estaban en el rango de 1850-1910 MHz, y los descendentes en 1930-1990 MHz. Las ondas son de 16 cm de largo, por lo que la antena es de sólo 4 cm de longitud y permite teléfonos más pequeños.

En un teléfono móvil D-AMPS, la señal de voz capturada por el micrófono se digitaliza y comprime. La compresión toma en cuenta propiedades del sistema de voz humano para obtener el ancho de banda de la codificación PCM estándar de 56 a 8 kbps o menos. La compresión se crea mediante un circuito llamado **vocoder**. Esto permite que 3 usuarios puedan compartir un solo par de frecuencias que utilicen la multiplexión por división de tiempo. Cada par de frecuencia maneja 25 tramas/seg de 40 mseg cada uno. Cada trama mantiene 3 usuarios que se turnan para utilizar los enlaces ascendente y descendente. Al usar mejores algoritmos de compresión es posible obtener 4 kbps pudiendo agrupar 6 usuarios en una trama.

La estructura de control de D-AMPS es bastante complicada; una supertrama está formada por grupos de 16 tramas y, algunas veces, cada supertrama tiene cierta información de control. Se utilizan seis canales principales de control: configuración del sistema, control en tiempo real y en tiempo no real, localización, respuesta de acceso y mensajes cortos. Como durante 1/3 del tiempo los teléfonos no necesitan enviar ni recibir, utilizan estas ranuras inactivas para medir la calidad de la línea, cuando se descubre que la señal se debilita, avisa a la MTSO, la cual interrumpe la conexión y el teléfono trata de sintonizar una señal más fuerte desde otra estación base. El proceso toma 300 mseg al igual que en AMPS. Esta técnica se conoce como **MAHO** (transferencia asistida móvil de celda).

GSM – Sistema Global para comunicaciones móviles

Ampliamente utilizado fuera de EEUU y Japón, es similar a D-AMPS. En ambos se utiliza la multiplexión por división de frecuencia (transmite en una frecuencia y recibe en otra mayor) y también utilizan la multiplexión por división de tiempo (ranuras de tiempo compartido). Sin embargo los canales GSM son mucho más anchos que los AMPS y almacenan relativamente pocos usuarios. Un sistema GSM tiene 124 pares de canales símplex. Cada uno tiene una longitud de 200 kHz y maneja ocho conexiones por separado mediante multiplexión por división de tiempo. En teoría cada celda puede manejar hasta 992 canales, pero la mayoría no está disponible (para evitar conflictos con celdas vecinas). Los radios GSM no pueden transmitir y recibir al mismo tiempo. Las ranuras TDM son parte de una jerarquía compleja de entramado. Cada ranura TDM consiste en tramas de datos de 148 bits que ocupan el canal por 577 μ seg. Cada trama de datos inicia y termina con tres bits 0 y contiene dos campos de información de 57 bits, cada uno de los cuales tiene un bit de control que indica si es voz o datos. Entre los campos de información hay un campo de sincronización de 26 bits. La carga útil para usuario es de 24.7 kbps. Luego de la corrección de errores quedan 13 kbps para voz.

8 tramas de datos forman una trama TDM y 26 tramas TDM forman una multitrama de 120 mseg.

CDMA Acceso múltiple por división de código

Trabaja de forma totalmente diferente a D-AMPS y GSM. Es visto como la mejor solución técnica existente y como la base para los sistemas móviles de la tercera generación. CDMA se describe en el estándar IS-95. En lugar de dividir en rango de frecuencia permitida en algunos cientos de canales estrechas, CDMA permite que cada estación transmita todo el tiempo a través de todo el espectro de frecuencia. Se utiliza la teoría de codificación para separar múltiples transmisiones simultáneas.

Cada tiempo de bit se subdivide en m intervalos cortos llamados **chips**. Hay 64 o 128 chips por bits. A cada estación se le asigna un código único de m bits llamado **secuencia de chip**. Para transmitir un bit 1 una estación envía su secuencia de chip. Para transmitir un 0 envía el complemento a esa secuencia.

El sistema es realmente complejo, si se desea profundizar hay que ver el libro desde la página 163.

Analogía sobre los sistemas

En una sala de espera hay muchas parejas de personas conversando. TDM se compara con todas las personas que están en medio de la sala pero que esperan su turno para hablar. FDM se compara con las personas que están en grupos separados ampliamente y cada grupo tiene su propia conversación al mismo tiempo. CDMA se compara con el hecho de que todas las personas estén en medio de la sala hablando al mismo tiempo, pero cada pareja hablando en un lenguaje diferente.

6.3 Teléfonos móviles de tercera generación: voz y datos digitales

En 1992, la ITU diseñó un estándar para implementar un nuevo sistema que permitiera la convergencia de varias tecnologías en un solo dispositivo con conectividad inalámbrica a Internet en todo el mundo con un ancho de banda alto. Se llamó IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales). La ITU recomendó a los países que reservaran el espectro de 2 GHz (donde se suponía que iba a funcionar), pero sólo lo hizo China.

Los servicios básicos que se supone que proporcionará son:

1. Transmisión de voz de alta calidad
2. Mensajería (para reemplazar el e-mail, faxes, SMS, chats, etc)
3. Multimedia (música, videos, películas, televisión, etc)
4. Acceso a Internet (Web incluyendo páginas con audio y video)

Otros servicios adicionales podrían ser la videoconferencia, telepresencia, juegos en grupo y e-commerce. Además, estos servicios deben estar disponibles a nivel mundial de manera instantánea y con calidad de servicio. La ITU visualizó una tecnología sencilla para IMT-2000 pero comenzó una guerra de formatos, la cual no es buena. Después de varias propuestas aparecieron dos opciones: **W-CDMA** (CDMA de banda ancha) propuesta por Ericsson diseñado para interactuar con redes GSM aunque no tienen compatibilidad hacia atrás con GSM. La particularidad es que puede salir de una celda W-CDMA y entrar en una GSM sin perder la llamada. Este sistema fue impulsado por la Unión Europea que lo llamo **UMTS** (Sistema Universal de Telecomunicaciones). El otro contendiente era **CDMA2000** propuesto por Qualcomm. Es una extensión de IS-95 y es compatible hacia atrás con él. No interctúa con GSM y no puede entregar llamadas a una celda GSM ni D-AMPS.

Mientras se espera el 3G, han salido algunos sistemas 2.5G como EDGE (Tasa de datos mejorada para la evolución del GSM) que simplemente es GSM con más bits por baudio (y por consiguiente más errores por baudio); y GPRS que es una red de paquetes superpuestos encima de D-AMPS o GSM.

7 Televisión por cable

Es una alternativa para la conectividades de red fija que está tomando mucha importancia. Los operadores de cable están trabajando arduamente para incrementar su participación el mercado.

7.1 Televisión por antena comunal

En la última parte de la década de 1940 se concibió la televisión por cable como una forma de proporcionar mejor recepción a las personas que viven en las áreas rurales o montañosas. Se colocó una antena grande en la cima de una colina, un amplificador *head end* para reforzar la señal y un cable coaxial para enviarla a los hogares.

En los primeros años, la televisión por cable era un servicio prestado por un vecino hábil en electrónica a sus vecinos, y se le dio el nombre de comunitario porque era abonado entre todos. En 1970 ya existían miles de sistemas independientes. En 1974 apareció HBO con contenido que solo se distribuía por cable, luego siguieron otros canales con el mismo sistema. Esto dio origen a dos cambios: primero, las grandes compañías comenzaron a comprar sistemas de cable existentes e instalar nuevo cable para adquirir más suscriptores y, segundo, surgió la necesidad de conectar múltiples sistemas.

7.2 Internet a través de cable

A medida que el sistema de televisión por cable creció se fue implementando la fibra de ancho de banda alto en el cableado. Un sistema con fibra para distancias considerables y cable coaxial para las casas se conoce como **sistema HFC** (Red híbrida de fibra óptica y cable coaxial). Los convertidores electroópticos se llaman **nodos de fibra**. Un nodo de fibra puede alimentar múltiples cables coaxiales.

Muchos operadores de cable han decidido entrar al negocio de acceso a Internet y al de telefonía, por lo que todos los amplificadores de una vía del sistema deben reemplazarse por uno de dos vías. Por otro lado, en los barrios, muchas casas comparten un solo cable, por lo que cuando ése mismo cable se utiliza para conectarse a Internet, el hecho de que haya 10 o 10.000 usuarios tiene mucha importancia. El ancho de banda utilizado por un usuario incide en el de los demás. En ADSL eso no pasa. Eso sí, el ancho de banda de un coaxial es mucho mayor que el de un par trenzado.

La forma en que la industria del cable ha abordado este problema es dividiendo los cables largos y conectándolos directamente al nodo de fibra. Siempre y cuando no haya demasiados suscriptores en cada segmento del cable, la cantidad de tráfico será manejable. Los cables típicos tienen entre 500-2000 casas.

7.3 Asignación de espectro

Los operadores de cable necesitaron encontrar una manera de que la televisión e Internet coexistan en el mismo cable. Los canales de televisión ocupan la región de 54-550 MHz (en EEUU) o bien 65-550 MHz (Europa). La parte baja del espectro no se utiliza, y los cables modernos operan bien arriba en el rango de 550-750 MHz y más también. La solución elegida fue introducir canales ascendentes en 5-42 MHz (un poco más arriba en Europa) y flujo descendente en el extremo superior. Debido a que todas las señales de televisión son descendentes, es posible utilizar amplificadores ascendentes que funcionen en la región de 5-42 MHz y amplificadores descendentes que funcionen a 54 MHz y mayor. Por lo tanto, se obtiene una asimetría.

Los cables coaxiales largos no son mejores para transmitir señales digitales que los circuitos locales largos. El esquema usual es tomar cada canal descendente de 6 u 8 MHz y modularlo con QAM-64 o, si la calidad lo permite, QAM-256. Con un canal de 6 MHz y QAM-64 se obtiene 27 Mbps de carga útil. Con QAM-256 se obtienen aproximadamente 39 Mbps. Para el flujo ascendente, incluso QAM-64 no funciona bien debido a que hay mucho ruido y se utiliza un esquema QPSK que proporciona sólo 2 bits por baudio. Además de actualizar los amplificadores hay que actualizar el amplificador *head end* a un sistema de cómputo digital inteligente con una interfaz de fibra de ancho de banda alto a un ISP. Su nombre también se actualiza a **CMTS** (Sistema de terminación de Módem de Cable) aunque se lo suele llamar *head end*.

7.4 Módems de cable

El acceso a Internet requiere un módem de cable, un dispositivo que tiene dos interfaces: una en la computadora y la otra en la red de cable. En los primeros años de Internet por cable, cada operador tenía un módem de cable patentado, sin embargo, pronto quedó claro que un estándar abierto podría crear un mercado de módems de cable más competitivo y bajar los precios, con lo que se alentaría el uso del servicio. Los operadores de cable se unieron a una compañía llamada CableLabs para producir un módem de cable estándar. El estándar llamado **DOCSIS** (Especificación de interfaz para servicios de datos por cable) está reemplazando los módems patentados.

La interfaz módem a computadora es directa, vía Ethernet a 10-Mbps o bien USB. El sistema está siempre activo: establece una conexión cuando se enciende y se mantiene todo el tiempo que tenga energía. Cuando un módem se conecta y activa, el módem explora los canales descendentes en busca de un paquete especial que el amplificador transmite periódicamente para proporcionar parámetros del sistema a los módems que se acaban de conectar. Al encontrar éste paquete el nuevo módem anuncia su presencia en un canal ascendente. El amplificador head end responde asignando al módem canales ascendentes y descendentes. Estas asignaciones pueden cambiarse más tarde por balanceo de carga. Luego, el módem determina su distancia al amplificador head end enviando un paquete y tomando el tiempo de respuesta. Proceso conocido como **alineación** (ranging). Saber la distancia permite reubicar el camino de los canales ascendentes y para obtener la temporización correcta. Dichos canales se dividen en **minirranuras**. La longitud de éstas depende de la red. La carga útil típica es de 8 bytes.

Durante la inicialización, el amplificador head end también asigna a cada módem una minirranura a fin de utilizarla para solicitar el ancho de banda ascendente. La misma se minirranura se asignará a múltiples módems. Cuando una computadora necesita enviar un paquete lo transfiere al módem, el cual solicita el número necesario de minirranuras para realizar el envío. Si la solicitud es aceptada, el amplificador head end coloca una confirmación de recepción en el canal descendente que indica al módem cuales se le han reservado. El paquete se envía.

Si hay contienda por la minirranura solicitada no habrá confirmación de recepción, por lo que el módem espera un tiempo aleatorio y vuelve a intentar. Los canales descendentes se manejan diferente, solo hay un emisor (el amplificador head end) por lo que no hay contienda ni necesidad de minirranuras, lo que en realidad es multiplexión estadística por división de tiempo. Se utiliza un tamaño fijo de 204 bytes. Parte de esto es un código de corrección de errores Reed-Solomon y otra es sobrecarga. La carga útil es de 184 bytes. Una vez que el módem ha terminado la alineación y obtenido su canal ascendente, el descendente y las minirranuras, puede comenzar a enviar paquetes. El primer paquete que se envía es uno para el ISP pidiéndole una dirección IP, que se asigna dinámicamente mediante DHCP. También solicita y obtiene una hora precisa del amplificador. Debido a que el cable es un medio compartido, el tráfico se encripta en ambas direcciones, por lo que en el proceso de inicialización se establecen las claves de encriptación. Por último, el módem tiene que iniciar sesión y proporcionar su identificador único a través del canal seguro.

7.5 ADSL vs Cable

Los dos utilizan fibra óptica en su red dorsal pero difieren en el extremo. La capacidad de carga teórica del cable coaxial es de cientos de veces más que el cable de par trenzado, sin embargo no está disponible para datos ya que la mayor parte la ocupa la señal de televisión. Los proveedores de ADSL indican específicamente el ancho de banda y por lo general logran el alrededor del 80%. Los proveedores de cable no dan indicación alguna porque la capacidad depende de cuántas personas están activas en el segmento de cable. Por lo tanto, en el cable, mientras más se suscriban, el rendimiento de los usuarios existentes disminuye. Debido a que ADSL es punto a punto, es inherentemente más seguro que el cable. El sistema telefónico, por lo general, es más confiable que el de cable, ya que, por ejemplo, funciona ante una falla de energía.

Capítulo 3

Se profundiza en el estudio de la capa 2, enlace de datos y en los algoritmos para lograr una comunicación confiable y eficiente entre dos máquinas conectadas por una canal de comunicación. Como éstos canales cometen errores, tienen una tasa de datos finitas y hay retardo de propagación, los protocolos deben suplir estas falencias.

1 Cuestiones de diseño de la capa de enlace de datos

Las funciones de la capa son:

1. Proporcionar una interfaz de servicio bien definida a la capa de red
2. Manejar errores de transmisión
3. Regular el flujo de datos

La capa de enlace toma los paquetes entregados por la capa de red y los encapsula en tramas para transmitirlos, que contiene un encabezado, un campo de carga útil (*payload*) para almacenar el paquete y un terminador o final. **El manejo de tramas es primordial.**

El control de errores y el de flujo, también están presentes en la capa de transporte y en otros protocolos. De hecho, en muchas redes, no está presente en la capa de enlace. Independientemente de donde se encuentren, los principios son casi los mismos.

1.1 Servicios proporcionados a la capa de red

El servicio principal es transferir datos de la capa de red de origen a la capa de la máquina destino. En la capa de red origen, hay un proceso que entrega bits a la capa de enlace que debe encargarse de transmitir los bits a la máquina de destino para que sean entregados a su capa de red. La capa de enlace puede ofrecer varios servicios, y varían de sistema a sistema. Los 3 más frecuentes son:

1. **Servicio no orientado a la conexión sin confirmación de recepción**
No se realiza ningún intento por detectar pérdidas ni recuperarlas. Servicio apropiado cuando la tasa de errores es muy baja. La recuperación se deja a las capas superiores. También apropiada para tráfico en tiempo real (ej. Voz). La mayoría de las LANs utilizan este servicio.
2. **Servicio no orientado a la conexión con confirmación de recepción**
El emisor solicita confirmación, por lo que si la trama no llega correctamente puede volver a enviarla. Servicio útil en canales inestables como los inalámbricos.
3. **Servicio orientado a la conexión con confirmación de recepción**
Origen y destino establecen una conexión antes de transferir datos. Cada trama está numerada, y la capa de enlace de datos garantiza que cada trama enviada llegará a su destino y que será recibida exactamente una vez. Es el equivalente a un flujo de bits confiable. Consta de 3 fases: conexión (donde se inicializan las variables y contadores), transmisión y cierre (libera variables, búfers y otros recursos).

Vale destacar que las confirmaciones de recepción son una optimización no un requisito. Esta responsabilidad puede delegarse a la capa de red en canales confiables en los que la recepción generaran sobrecarga y no brindan una utilidad real.

Es responsabilidad del protocolo de enlace de datos hacer que las líneas de comunicación no estables parezcan perfectas o, cuando menos, bastante buenas.

1.2 Entramado

La capa física acepta un flujo de bits puros e intenta entregarlo a destino, no garantiza que este flujo esté libre de errores, es responsabilidad de la capa de enlace de datos. El método común consiste en que la capa de enlace divida el flujo de bits en tramas separadas y que calcule la suma de verificación de cada trama. Cuando llega a destino, se recalcula la suma de verificación. Si la nueva suma calculada es distinta de la contenida en la trama, se sabe que hay un error y se toman medidas.

La división de tramas no es fácil, hay varias maneras de lograrlo. Una manera es introducir intervalos de tiempo, pero las redes pocas veces ofrecen garantías sobre la temporización. Puesto que es demasiado riesgoso depender de la temporización, se han diseñado otros métodos, se verán cuatro:

1. Conteo de caracteres

Se vale de un campo en el encabezado para especificar el número de caracteres en la trama. El problema es que la cuenta puede alterarse por un error de transmisión y se pierde la sincronía, haciéndose imposible localizar el inicio de la siguiente trama. Actualmente, éste método prácticamente no se utiliza.

2. Banderas, con relleno de caracteres

Este evita el problema de tener que sincronizar nuevamente después de un error, haciendo que cada trama inicie y termine con bytes especiales. Si el receptor pierde la sincronía, simplemente puede buscar la bandera (*flag*). Dos banderas consecutivas señalan el final de una trama y el inicio de la siguiente. Se puede dar el caso de que el patrón de bits utilizado como bandera aparezca en los datos (*payload*). Para resolver este problema, se inserta un byte de escape especial (*ESC*) justo antes de cada bandera “accidental” en los datos. Si sucede que un byte de escape aparece en medio de los datos, se rellena también con un byte de escape. Una desventaja importante es que está fuertemente atada a los caracteres de 8 bits. UNICODE por ejemplo utiliza 16 bits.

3. Banderas de inicio y fin, con relleno de caracteres

Permite que las tramas de datos contengan un número arbitrario de bits y admite códigos de caracteres con un número arbitrario de bits por carácter. Cada trama comienza y termina con un patrón especial de bits, 01111110 (el *flag*). Cada vez que la capa de enlace del emisor encuentra cinco unos consecutivos en los datos, inserta un bit cero en el flujo de bits saliente. Cuando el receptor ve cinco bits uno consecutivos, seguidos de un bit cero, automáticamente extra el bit cero de relleno. De ésta manera, el bit de relleno puede ser reconocido sin ambigüedades.

4. Violaciones de codificación de la capa física

Se aplica en redes en que la codificación en el medio físico contiene cierta redundancia, Por ejemplo, algunas LANs codifican un bit de datos usando dos bits físicos (1 y 0). Cada bit de datos tiene una transición a medio camino, lo que hace fácil para el receptor localizar los límites de los bits.

Muchos protocolos de enlace de datos usan una combinación de cuenta de caracteres con uno de los otros métodos.

1.3 Control de errores

El objetivo es asegurar que todas las tramas realmente lleguen a destino en el orden apropiado. La manera normal de asegurar la entrega confiable de datos es proporcionar retroalimentación al emisor sobre lo que está ocurriendo en el otro lado de la línea, lo que exige que el receptor regrese tramas de control especial confirmando recepciones positivas (llego bien) o negativas (llego con errores). Una complicación adicional surge de la posibilidad de que los problemas de hardware causen la desaparición de una trama completa, por lo que el receptor no reaccionará en absoluto. En este caso, el emisor espera una confirmación de recepción, por lo que se quedaría esperando eternamente. Esto se maneja introduciendo temporizadores, por ejemplo, cuando se envía una trama se inicia un temporizador, cuando este expira, alerta al emisor y se reenvía la trama. El tiempo de temporizador debe estar ajustado en un intervalo suficiente como para que la trama llegue a destino y regrese la confirmación. Hay un inconveniente en reenviar tramas, que el receptor las acepte y las pase a la capa de red. Para evitar esto se asignan números de secuencia a las tramas a fin de que el receptor pueda distinguir las retransmisiones.

1.4 Control de flujo

Si el emisor envía tramas a mayor velocidad que lo que puede manejar el receptor, llega un momento en que se satura y no podrá manejar las tramas que llegan. Se utilizan dos métodos: el **control de flujo basado en retroalimentación**, en el que el receptor regresa información que autoriza al emisor a enviar más datos o le indica su estado; y el **control de flujo basado en tasa**, en el cual es protocolo tiene un mecanismo que limita la tasa de envío sin recurrir a retroalimentación. Este último no se utiliza en la capa de enlace de datos.

2 Detección y corrección de errores

Los errores en algunos medios tienden a aparecer en ráfagas y no de manera individual, lo cual tiene ventajas y desventajas. Ventajas: los datos de computadora siempre se envían en bloques de bits. Suponga que el tamaño del bloque es de 1000 bits y la tasa de errores de 0.001 por bit. Si los errores fueran independientes la mayoría de los bloques contendría un error. Si los errores llegan en ráfagas de 100, en promedio sólo uno o dos bloques de cada 100 serán afectados. La desventaja de los errores en ráfaga es que son mucho más difíciles de detectar y corregir.

2.1 Códigos de corrección de errores

Dos estrategias principales para manejar los errores. Una es incluir suficiente información redundante en cada bloque para que el receptor pueda deducir lo que debió ser el carácter transmitido. La otra estrategia es incluir sólo suficiente redundancia para permitir que el receptor sepa que ha ocurrido un error y entonces solicita una retransmisión. La primera estrategia utiliza **códigos de corrección de errores** (o **corrección de errores hacia adelante**), la segunda **códigos de detección de errores**.

En los canales que son altamente confiables, como los de fibra, es más económico utilizar un código de detección de errores y retransmitir los bloques defectuosos. En canales que causan muchos errores es mejor agregar redundancia suficiente a cada bloque para que el receptor pueda descubrir cuál era el bloque original transmitido.

Por lo general, una trama consiste en m bits de datos y r bits redundantes o de verificación. Sea la longitud total n ($n = m + r$). Una unidad de n bits que contiene datos y bits de verificación se conoce como la **palabra codificada** de n bits.

Dadas dos palabras codificadas cualesquiera, digamos 10001001 y 10110001, es posible determinar cuántos bits correspondientes difieren, basta aplicar un XOR (exclusive OR) a las dos palabras codificadas y contar la cantidad de bits 1 en el resultado. Ésta cantidad se llama **distancia de Hamming**. Su significado es que, si dos palabras codificadas están separadas una distancia de Hamming d , se requerirán d errores de un bit para convertir una en la otra.

En la mayoría de las aplicaciones de transmisión de datos, todos los 2^m mensajes de datos posibles son legales, pero no se usan todas las 2^n palabras codificadas posibles. Dado el algoritmo de cálculo de los bits de verificación, es posible construir una lista completa de palabras codificadas legales y encontrar, en esta lista, las dos palabras codificadas cuya distancia de Hamming es mínima. Ésta es la distancia de Hamming de todo el código.

Las propiedades de detección y corrección de errores de un código dependen de su distancia de Hamming. Para detectar d errores se necesita un código con distancia $d + 1$. Cuando el receptor ve una palabra codificada no válida, sabe que ha ocurrido un error de transmisión. Las palabras codificadas legales están tan separadas que, aun con d cambios, la palabra codificada original sigue estando más cercana que cualquier otra palabra codificada.

Los códigos de Hamming sólo pueden corregir errores individuales. Sin embargo, hay un truco que puede servir para que corrijan errores de ráfaga. Se dispone como matriz una secuencia de k palabras codificadas consecutivas, con una palabra codificada por fila. Los datos se transmiten de a columnas, comenzando por la del extremo izquierdo. Cuando la trama llega al receptor, la matriz se reconstruye. Si ocurre un error en ráfaga de longitud k , cuando mucho se habrá afectado 1 bit de cada una de las k palabras codificadas; sin embargo, el código de Hamming puede corregir un error por palabra codificada, así que puede restaurarse la totalidad del bloque.

2.2 Códigos de detección de errores

Se utilizan de manera amplia en los enlaces inalámbricos por ser más ruidosos y propensos a errores. Sin los códigos de corrección de errores sería difícil pasar cualquier cosa.

Aunque en algunos casos puede utilizarse el método visto anteriormente (el de la matriz con código Hamming), en la práctica se usa uno muy definido: el **código polinomial** (también conocido como **código de redundancia cíclica** o **código CRC**). Se basa en el tratamiento de cadenas de bits como representaciones de polinomios con coeficientes de 0 y 1 solamente. Una trama de k bits se considera como la lista de coeficientes de un polinomio con k términos que van de x^{k-1} a x^0 . Tal polinomio es de grado $k - 1$. Ejemplo: 110001 tiene 6 bits, y por lo tanto, representa un polinomio de seis términos con coeficientes 1,1,0,0,0 y 1: $x^5 + x^4 + x^0$.

La aritmética polinomial se hace mediante una operación módulo 2. No hay acarreo, la suma como la resta son idénticas a un XOR.

La división se lleva a cabo de la misma manera que en binario, excepto que la resta es módulo 2, igual que antes. Se dice que un divisor "cabe" en su dividendo si éste tiene tantos bits como el divisor.

Cuando se emplea el método de código polinomial, emisor y receptor deben acordar un **polinomio generado** $G(x)$. Tanto los bits de orden mayor y menor del generador deben ser 1. La trama debe ser más larga que el polinomio generador. La idea es incluir una suma de verificación al final de la trama de tal manera que el polinomio representado por la trama con suma de verificación

sea divisible entre $G(x)$. Cuando el receptor recibe la trama con suma de verificación, intenta dividirla entre $G(x)$. Si hay un residuo, ha habido un error de transmisión.

1. Sea r el grado de $G(x)$. Anexe r bits cero al final de la trama, para que ahora contenga $m + r$ bits y corresponda al polinomio $x^r M(x)$.
2. Divida la cadena de bits correspondiente a $G(x)$ usando una división módulo 2.
3. Reste el residuo a la cadena de bits correspondiente a $x^r M(x)$ usando una resta módulo 2. El resultado es la trama con suma de verificación que va a transmitirse. Llame a su polinomio $T(x)$.

Debe quedar claro que $T(x)$ es divisible (módulo 2) entre $G(x)$.

3 Protocolos elementales de enlace de datos

Se verán tres protocolos de complejidad creciente. Estamos suponiendo que en las capas física, de enlace de datos y de red hay procesos independientes que se comunican pasando mensajes de un lado a otro. Otro supuesto clave es que la máquina A desea mandar un flujo considerable de datos a la máquina B usando un servicio confiable orientado a la conexión. Después consideraremos el caso en que B también quiere mandar datos a A de manera simultánea. A tiene un suministro infinito de datos y nunca tiene que esperar a que se produzcan datos.

También supondremos que las máquinas no fallan. En lo que concierne a la capa de enlace de datos, el paquete que le pasa a través de la interfaz desde la capa de red es de datos puros, que deben ser entregados bit por bit a la capa de red. El hecho de que la capa de red del destino pueda interpretar parte del paquete como un encabezado no es de importancia para la capa de datos.

Cuando la capa de enlace de datos acepta un paquete, lo encapsula en una trama agregándole información de control (en el encabezado) y una suma de verificación (en el terminador). El hardware emisor calcula y agrega la suma de verificación por lo que el software de la capa de enlace no necesita preocuparse por ella. Se supondrá que la capa de enlace está en espera de que ocurra algo, aunque en la realidad, no queda en un ciclo cerrado de espera sino que recibe una interrupción.

Cuando llega una trama al receptor, el hardware calcula la suma de verificación. Si ésta es correcta o incorrecta, se informa la novedad a la capa de enlace de datos. Si es correcta la capa puede adquirir la trama para inspeccionarla, revisa la información de control del encabezado y pasa la parte que corresponde a la capa de red. En ningún caso se entrega un encabezado a la capa de red, ya que los protocolos deben estar separados completamente, lo que permite que evolucionen en forma independiente.

La capa de enlace de datos emisora debe arrancar un temporizador cada vez que envía una trama. Si no obtiene respuesta, el temporizador expira y la capa de enlace de datos recibe una interrupción.

3.1 Un protocolo simplex sin restricciones

Consideraremos un protocolo que es lo más sencillo posible. Los datos se transmiten en una sola dirección, las capas están siempre listas, búfer infinitos, el canal de comunicación entre capas nunca tiene problemas ni pierde tramas.

El protocolo consiste en dos procedimientos diferentes, uno emisor y uno receptor. No se usan números de secuencia.

El emisor está en un ciclo *while* infinito que sólo envía datos a la línea tan rápidamente como puede. Tres acciones: obtener paquete de la capa de red, construir trama de salida y enviarla. No hay restricciones control de errores ni de flujo.

El receptor también es sencillo, espera que algo ocurra, siendo la única posibilidad la llegada de una trama sin daños. En algún momento, la trama llega y pasa la parte de datos a la capa de red.

3.2 Protocolo simplex de parada y espera

Omitiremos el supuesto de la capacidad de la capa de red receptora, de procesar datos de entrada con una rapidez infinita. Todavía se supone canal libre de errores y tráfico de datos simplex.

El problema principal es evitar que el emisor sature al receptor. El emisor nunca debe transmitir una nueva trama hasta que el receptor no haya recuperado la trama desde la capa física. En ciertas circunstancias (por ej. transmisión síncrona) el emisor podría introducir simplemente un retardo en el protocolo y así reducir su velocidad lo suficiente para evitar que se sature el

receptor. Una solución más general es hacer que el receptor proporcione retroalimentación al emisor: tras haber pasado un paquete a la capa de red, se regresa una pequeña trama ficticia al emisor que lo autoriza para transmitir otra trama. Esto se denomina protocolo de parada y espera.

Aunque el tráfico de datos es simplex, las tramas viajan en ambas direcciones. Es decir que el canal necesita capacidad de transferencia de información bidireccional, por lo que sería suficiente un canal semidúplex.

La capa de enlace de datos emisora no necesita inspeccionar la trama entrante, ya que sólo hay una posibilidad: que la trama sea de confirmación de recepción.

3.3 Protocolo simplex para un canal con ruido

Suponemos ahora una situación normal en la que en canal de comunicación comete errores. Las tramas pueden llegar dañadas o perderse por completo.

Podría parecer que utilizar un temporizador funcionaría, pero podría pasar que el emisor envía una trama y llega corrupta, por lo que el receptor no envía confirmación. Cuando el temporizador expira, el emisor vuelve a enviar la trama, y así sucesivamente hasta que la trama llega bien y el receptor devuelve la trama de confirmación... aunque si la trama de confirmación no llega correctamente al emisor, el temporizador vuelve a expirar, y el emisor vuelve a enviar la trama. El receptor se encontrará con dos tramas iguales y correctas, por lo que deberá contar con algún mecanismo que impida pasar dos tramas iguales a la capa de red. Para ello se utiliza un número de secuencia en el encabezado de cada trama. Es deseable que este encabezado sea pequeño. Por lo tanto, el número de secuencia puede ser de 1 bit (1 o 0), y de esta manera, cualquier trama de entrada que contenga un número de secuencia equivocado se rechaza como duplicado.

Los protocolos en los que el emisor espera una confirmación de recepción positiva antes de avanzar al siguiente elemento de datos suelen llamarse **PAR** (Confirmación de Recepción Positiva con retransmisión) o **ARQ** (Solicitud automática de repetición).

Tras transmitir una trama y arrancar el temporizador, hay 3 posibilidades: llega una trama de confirmación de recepción sin daño, llega una trama de confirmación de recepción incorrecta o expira el temporizador.

Cuando llega una trama válida al receptor, su número de secuencia se verifica para saber si es un duplicado. Si no lo es, se acepta, se pasa a la capa de red y se genera una confirmación de recepción. Los duplicados y las tramas dañadas no se pasan a la capa de red.

4 Protocolos de ventana corrediza

Necesidad de transmitir en ambas direcciones. Una manera es tener dos canales de comunicación separados con tráfico de datos simplex, es decir, dos circuitos físicos separados. En ambos se desperdicia casi por completo el ancho de banda del canal usado para confirmaciones de recepción. Una mejor idea es utilizar el mismo circuito en ambas direcciones. Analizando el campo de "tipo" en el encabezado de una trama de entrada, el receptor puede saber si la trama es de datos o de confirmación de recepción. Se puede lograr otra mejora, cuando llega una trama de datos, en lugar de enviar inmediatamente la trama de control, el receptor se aguanta y espera hasta que la capa de red pase el siguiente paquete y entonces, la confirmación de recepción se anexa a la trama de datos de salida. Ésta técnica de retardar temporalmente las confirmaciones se conoce como **superposición** (*piggybacking*). De esta manera se aprovecha mejor el canal e implica menos interrupciones de "ha llegado trama". Sin embargo, introduce una complicación: ¿Cuánto tiempo debe esperar la capa de enlace por un paquete al cual superponer la confirmación de recepción? La capa de enlace debe recurrir a algún esquema particular como esperar un número fijo de milisegundos, si no llega ningún paquete, se envía una trama de confirmación de recepción independiente.

Se verán 3 protocolos de ventana corrediza. Difieren entre ellos en eficiencia, complejidad y requerimientos de búfer. En ellos, cada trama de salida contiene un número de secuencia, que va desde 0 hasta algún número máximo. En cualquier instante, el emisor mantiene un grupo de números de secuencia correspondiente a las tramas que tiene permitido enviar. Se dice que estas tramas caen dentro de la **ventana emisora**. El receptor mantiene una **ventana receptora**. Estas ventanas no necesitan tener los mismos límites inferior y superior, ni siquiera el mismo tamaño. En algunos protocolos las ventanas son de tamaño fijo, en otros son dinámicas.

Aunque estos protocolos dan a la capa de enlace de datos mayor libertad en cuanto al orden en que puede enviar y recibir tramas, hemos conservado decididamente el requisito de que el protocolo debe entregar los paquetes a la capa de red del destino en el mismo orden en que se pasaron a la capa de enlace de datos de la máquina emisora.

Los números de secuencia en la ventana del emisor representan tramas enviadas o que pueden ser enviadas, pero cuya recepción aún no se ha confirmado. Cuando llega un paquete nuevo de la capa de red, se le da el siguiente número secuencial mayor, y el extremo superior de la ventana avanza en uno. Al llegar una confirmación de recepción, el extremo inferior avanza en uno. El emisor debe mantener estas tramas hasta que se confirmen, ya que pueden perderse o dañarse en tránsito y deberán retransmitirse.

La ventana de la capa de enlace de datos receptora corresponde a las tramas que puede aceptar. Toda trama que caiga fuera de la ventana se descartará sin comentarios. Cuando se recibe la trama cuyo número de secuencia es igual al extremo inferior de la ventana, se pasa a la capa de red, se genera una confirmación de recepción y se avanza la ventana en uno.

4.1 Un protocolo de ventana corrediza de un bit

Utiliza parada y espera. Normalmente, una de las dos capas de enlace es la que comienza a transmitir la primera trama. La máquina que arranca, obtiene el primer paquete de su capa de red, construye la trama y la envía. Al llegar la trama, la capa de enlace receptora la revisa para saber si es un duplicado; si la trama es la esperada, se pasa a la capa de red y la ventana del receptor se recorre hacia arriba. El campo de confirmación de recepción contiene el número de la última trama recibida sin error. Si este número concuerda con el de secuencia de la trama que está tratando de enviar el emisor, éste sabe que ha terminado con la trama almacenada en el *búfer* y que puede obtener el siguiente paquete de su capa de red. Si no concuerda, debe continuar intentando enviar la misma trama.

4.2 Protocolo que usa retroceso N

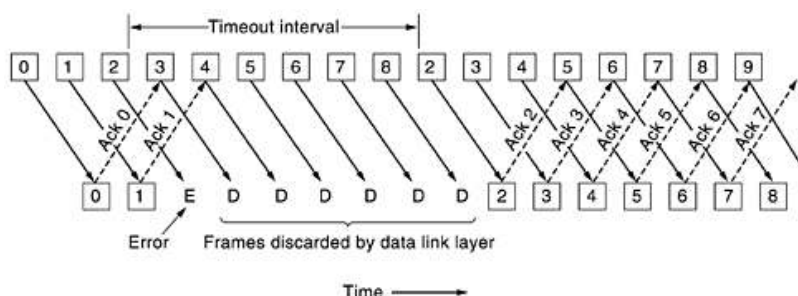
Hasta ahora hemos supuesto que el tiempo de transmisión requerido para enviar una trama y recibir una confirmación es insignificante, a veces ésta suposición es totalmente falsa. La combinación de un tiempo de tránsito grande, un ancho de banda alto y una longitud de tramas corta es desastrosa para la eficiencia.

En un canal de satélite con un retardo de propagación de ida y vuelta de 500 mseg el tiempo que se desperdicia en esperas es altísimo. La solución a esta ineficiencia está en permitir que el emisor envíe w tramas antes de bloquearse, en lugar de sólo una. Con una selección adecuada de w , el emisor puede enviar tramas continuamente durante un tiempo igual al tiempo de tránsito de ida y vuelta sin llenar la ventana. Si el ancho de banda es alto, incluso para un retardo moderado, el emisor agotará su ventana rápidamente a menos que tenga una ventana grande. Si el retardo es grande, el emisor agotará su ventana incluso con un ancho de banda moderado. El producto de estos dos factores indica cuál es la capacidad del canal. El emisor necesita la capacidad de llenar el canal sin detenerse para poder funcionar con una eficiencia máxima. Esta técnica se conoce como **canalización** y sirve para mantener ocupada la línea, aunque si los intervalos de propagación son pequeños, la complejidad adicional no justifica el esfuerzo.

El envío de tramas en canalización por un canal de comunicación inestable presenta problemas serios, ya que si se daña una trama a la mitad de una serie larga, ¿Qué debe hacer el receptor con las tramas correctas que recibe? La capa de enlace debe entregar los paquetes en orden a la capa de red. Hay dos métodos básicos para manejar los errores durante la canalización:

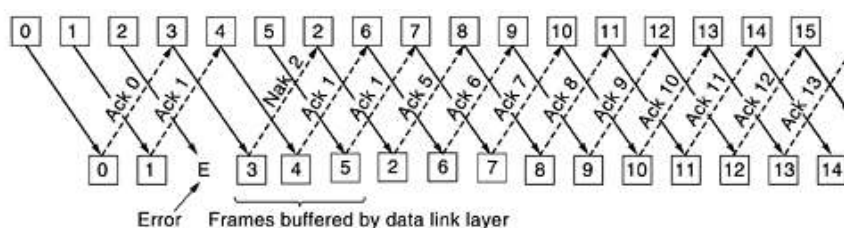
- Con **Retroceso n** el receptor simplemente descarta todas las tramas subsecuentes sin enviar confirmaciones de recepción para las tramas descartadas.

Se utiliza con ventana de recepción de tamaño 1. En algún momento, el emisor termina de esperar las confirmaciones y retransmitirá todas las tramas no recibidas en el orden correcto. Se desperdicia bastante ancho de banda si la tasa de errores es alta.



- La otra estrategia es **repetición selectiva**, cuando se descarta una trama dañada recibida, las tramas en buen estado recibidas después de ésta se almacenan en el búfer. Cuando el emisor termina, sólo la última trama sin confirmación se

retransmite. Si llega bien, la capa de enlace receptora puede pasar todos los paquetes correctamente a su capa de red. Esta estrategia se combina con la confirmación de recepción negativa (NAK) cuando detecta un error (ej. suma de verificación incorrecta o tramas en desorden), lo que motiva la retransmisión antes de que expire el temporizador del emisor, mejorando el rendimiento. La repetición selectiva se utiliza en ventana de receptor mayor a 1, por lo que puede requerir grandes cantidades de memoria en la capa de enlace.



Dado que un emisor puede tener que retransmitir todas las tramas no confirmadas, debe retener todas las tramas transmitidas hasta tener certeza de que fueron recibidas correctamente por el receptor. Al llegar una confirmación de recepción de la trama n , las tramas $n - 1$, $n - 2$, ... se confirman de manera automática. Esto es especialmente importante cuando algunas tramas previas portadoras de confirmaciones de recepción se perdieron o dañaron.

4.3 Protocolo que utiliza repetición selectiva

Teniendo en cuenta el protocolo anterior, si los errores son poco frecuentes, pero la línea es mala, se desperdicia mucho ancho de banda en líneas retransmitidas. Una estrategia alterna es permitir que el receptor acepte y coloque en *buffers* las tramas que siguen a una dañada o perdida.

La recepción no secuencial introduce ciertos problemas. Ejemplo, suponga que tenemos un número de secuencia de tres bits, por lo que se permite enviar hasta siete tramas antes de exigir una espera de confirmación de recepción. Supongamos que el emisor envía las tramas 0 a 6 (*), las siete tramas llegan correctamente, por lo que el receptor confirma su recepción y avanza su ventana para permitir la recepción de 7, 0, 1, 2, 3, 4 o 5 (**). En este momento, un problema en la línea "borra" las confirmaciones. Expira el temporizador del emisor y retransmite la trama 0 (del grupo de *). El receptor verifica si esta dentro de la ventana (**), lo cual es "correcto" y envía una confirmación de recepción, superpuesta, para la trama 6, ya que se han recibido de la 0 a la 6. El emisor se entera que todas sus tramas transmitidas han llegado de manera correcta, avanza su ventana y envía de inmediato las tramas 7, 0, 1, 2, 3, 4 y 5. El receptor aceptará la trama 7 y el paquete de ésta se pasará directamente a la capa de red. Inmediatamente después, la capa de enlace receptora revisa si ya tienen una trama 0 válida, descubre que sí y pasa el paquete que contiene a la capa de red. La capa de red obtiene un paquete incorrecto y falla el protocolo. La esencia del problema es que una vez que el receptor ha avanzado su ventana, el nuevo intervalo de números de secuencias válidos se traslapa con el anterior.

Para evitar este problema, el tamaño máximo de la ventana debe ser cuando menos de la mitad del intervalo de los números de secuencia. Por ejemplo, si se utilizan 4 bits para los números de secuencia, éstos tendrán un intervalo de 0 a 15. Sólo ocho tramas sin confirmación de recepción deben estar pendientes en cualquier instante.

5 Verificación de los protocolos

Demasiado complejo para resumir.

6 Ejemplos de protocolos de enlace de datos

Se examinarán dos protocolos HDLC, un clásico orientado a bits, y PPP, el utilizado en Internet.

6.1 HDLC – Control de enlace de datos de alto nivel

Este grupo de protocolos a pesar de ser un poco antiguo se sigue utilizando ampliamente. Derivan del primer protocolo de enlace de datos usado en los *mainframes* de IBM: el **SDLC** (Control Síncrono de Enlace de Datos). Este fue modificado por el ANSI convirtiéndolo en **ADCCP** (Procedimiento Avanzado de Control de Comunicación de Datos) y la ISO lo modificó para convertirlo en **HDLC**. Luego el CCITT lo modificó para su **LAP** (Procedimiento de Acceso al Enlace) como parte de la interfaz de red X.25, que luego modificó a **LAPB** para hacerlo más compatible con una versión posterior de HDLC. Todos estos protocolos se basan en el mismo principio. Todos son orientados a bits y usan el relleno de bits para lograr la transparencia de los datos y utilizan la siguiente estructura de trama:

Bits	8	8	8	≥ 0	16	8
	0 1 1 1 1 1 0	Address	Control	Data	Checksum	0 1 1 1 1 1 0

El campo de *Dirección* es primordial en líneas con múltiples terminales ya que sirve para identificarlas. El de *Control* se utiliza para números de secuencia, confirmaciones de recepción y otros propósitos. El campo de *Datos* puede contener cualquier información y tamaño, aunque la eficiencia de la suma de verificación disminuye conforme el tamaño de la trama aumenta. El campo de *Suma de verificación* es un código de redundancia cíclica.

La trama esta delimitada por la secuencia de bandera (01111110). La trama mínima contiene tres campos y un total de 32 bits, y excluye a las banderas de ambos lados.

Hay tres tipos de tramas: **de información(a)**, **de supervisión(b)** y **no numeradas(c)**. Se presenta el contenido del campo de *Control* para estos 3 tipos.

Bits	1	3	1	3
(a)	0	Seq	P/F	Next
(b)	1	0	Type	P/F
(c)	1	1	Type	P/F
				Modifier

El protocolo emplea una ventana corrediza con un número de secuencia de 3 bits.

Tramas de información

- **Secuencia** corresponde a la secuencia de la trama.
- **Siguiente** es una confirmación de recepción superpuesta, sin embargo, por convención se usa el número de la primera trama no recibida (es decir, la siguiente trama esperada)
- **P/F** significa *Sondeo/Final (Poll/Final)*. Se utiliza cuando una computadora (o concentrador) está sondeando un grupo de terminales. Cuando se usa como *P*, la computadora está invitando a la terminal a enviar datos. Todas las tramas enviadas por la terminal, excepto la última, tienen el bit *P/F* establecido en *P*. El último se establece en *F*.

Tramas de supervisión

- **Tipo** distingue los diferentes tipos de tramas de supervisión.
 - Tipo 0 es una trama de confirmación de recepción ACK que sirve para indicar la siguiente trama esperada. Se usa cuando no hay tráfico de regreso que se pueda aprovechar para superponer.
 - Tipo 1 es una trama de confirmación de recepción negativa (NAK). El campo *Siguiente* indica la primera trama que no se ha recibido en forma correcta.
 - Tipo 2 es *Receive not ready*; reconoce todas las tramas hasta, pero sin incluir, *siguiente*, indicando al emisor que detenga el envío por problemas temporales, como falta de búfer. Cuando el problema se resuelve, se envía ACK, NAK o ciertas tramas de control.
 - Tipo 3 es *Selective Reject*; solicita la retransmisión de sólo la trama especificada.

Tramas no numeradas

A veces se usa para control pero puede servir para llevar datos cuando se solicita un servicio no confiable sin conexión. Hay diferencias considerables entre los distintos protocolos. Hay cinco bits disponibles para indicar el tipo de trama enviada, pero no se utilizan las 32 posibilidades.

6.2 La capa de enlace de datos en Internet

Se examinarán los protocolos de enlace de datos usados en las líneas punto a punto de Internet. Este es el caso de interconectar dos LANs por intermedio de enrutadores, o también el caso de una conexión doméstica a Internet, entre la que se establece una conexión temporal (finaliza cuando el usuario cierra sesión) entre el acceso telefónico de *host* al enrutador del ISP. Para esto se utiliza el protocolo PPP.

PPP – Protocolo Punto a Punto

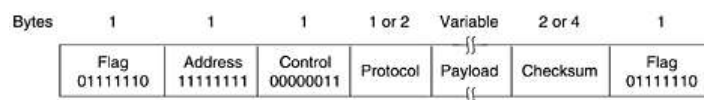
Este protocolo realiza detección de errores, soporta múltiples protocolos, permite la negociación de direcciones de IP en el momento de la conexión, permite la autenticación y tiene muchas otras funciones.

Proporciona tres características:

1. Un método de entramado que delinea sin ambigüedades el final de una trama y el inicio de la siguiente. El formato de trama también maneja la detección de errores.
2. Un protocolo de control de enlace (**LCP**) para activar líneas, probarlas, negociar opciones y desactivarlas ordenadamente cuando ya no son necesarias. Admite circuitos síncronos y asíncronos, y codificaciones orientadas a bits y a caracteres.
3. Un mecanismo para negociar opciones de capa de red con independencia del protocolo de red usado. El método escogido consiste en tener un Protocolo de Control de Red (**NCP**) distinto para cada protocolo de red soportado.

Se ejemplifica su funcionamiento en el caso de una conexión doméstica a Internet: la PC llama al enrutador del ISP a través de un módem, luego de que este contesta y se establece la conexión física, la PC manda una serie de paquetes LCP en el campo de carga útil de una o más tramas PPP. Éstos paquetes y sus respuestas definen los parámetros PPP por usar. Luego se envían paquetes NCP para configurar la capa de red. Por lo general, la PC requiere ejecutar una pila de protocolos TCP/IP por lo que se solicita una dirección IP mediante el NCP. Luego, la PC pasa a ser un *host* de Internet, pudiendo enviar y recibir paquetes IP. Cuando el usuario desea finalizar la conexión, se utiliza NCP para dismantlar la conexión de la capa de red y liberar la dirección IP. Luego con LCP lo mismo para la capa de enlace. Finalmente, el módem libera la conexión de la capa física.

Se presenta el formato de trama PPP.

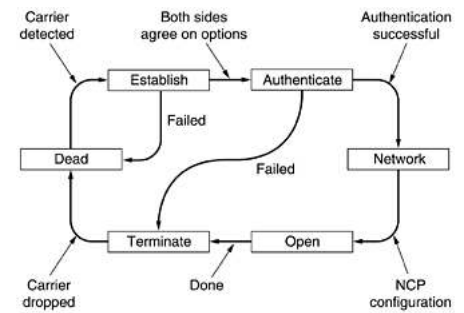


Todas las tramas PPP comienzan con la bandera estándar de HDLC (01111110). Luego está el campo de *Dirección*, que siempre se establece en 11111111 para indicar que todas las estaciones deben aceptar la trama. El campo de *Control* está predeterminado en 00000011, que indica una trama no numerada, ya que PPP no proporciona de manera predeterminada transmisión confiable usando números de secuencia y confirmaciones de recepción. En entornos ruidosos puede usarse, pero casi no se utiliza. LCP proporciona los mecanismos para que las dos partes negocien una opción para omitir los dos por completo y ahorrar dos bytes por trama. El campo *Protocolo* indica la clase de paquete que está en *Carga útil*. Los protocolos que comienzan con un bit 0 son de capa de red como IP, IPX, OSI CLNP, XNS. El tamaño predeterminado del campo de *protocolo* es de 2 bytes, pero puede negociarse a 1 byte usando LCP. Si no se establece, la longitud predeterminada es de 1500 bytes. De ser necesario se puede incluir un relleno después de la carga. Después está el campo de *Suma de verificación*, que normalmente es de 2 bytes, pero puede negociarse una suma de verificación de 4 bytes.

PPP es un mecanismo de entramado multiprotocolo adecuado para utilizarse a través de módems, líneas seriales de bits HDLC, SONET y otras capas físicas. Soporta detección de errores, negociación de opciones, compresión de encabezados y, opcionalmente, transmisión confiable con formato de tramas similar al de HDLC.

Se presenta el diagrama (simplificado) que representa la manera en que se activan y desactivan las líneas.

El protocolo inicia con la línea que tiene estado *MUERTA*, sin conexión de capa física. Una vez establecida pasa a *ESTABLECER*, punto de negociación de opciones LCP, si hay éxito pasa a *AUTENTICAR*. Las dos partes pueden verificar la identidad del otro. Al entrar en la fase *RED*, se invoca el protocolo NCP apropiado para configurar la capa de red. Luego llega *ABRIR* para comenzar el transporte de datos. Al finalizar, pasa a *TERMINAR* desde donde regresa a *MUERTA* al liberar la portadora.



El protocolo LCP se ocupa de los mecanismos de negociación y provee mecanismos para probar la calidad de la línea. También permite que las líneas se desactiven cuando ya no se necesitan. Hay 11 tipos de tramas LCP. Iniciador (I) y contestador (R).

Nombre	Dirección	Descripción
Configurar-solicitud	I -> R	Lista de opciones y valores propuestos
Configurar-confirmación de recepción	I <- R	Se aceptan todas las opciones
Configurar-confirmación de recepción negativa	I <- R	No se aceptan algunas opciones
Configurar-rechazo	I <- R	Algunas opciones no son negociables
Terminar-solicitud	I -> R	Solicitud de desactivación de la línea
Terminar-confirmación de recepción	I <- R	Línea desactivada
Código-rechazo	I <- R	Se recibió una solicitud desconocida
Protocolo-rechazo	I <- R	Se solicitó un protocolo desconocido
Eco-solicitud	I -> R	Favor de enviar de regreso esta trama
Eco-respuesta	I <- R	Aquí está la trama de regreso
Descartar-solicitud	I -> R	Descartar esta trama (para pruebas)

Las opciones que pueden negociarse incluyen el establecimiento del tamaño máximo de la carga útil, la habilitación de la autenticación y la selección del protocolo a emplear, habilitando el monitorio de la calidad de la línea durante la operación normal y la selección de varias opciones de compresión de encabezados.

Hay poco que decir sobre los protocolos NCP en un sentido general. Cada uno es específico para algún protocolo de capa de red y permite que se hagan solicitudes de configuración específicas de ese protocolo. Por ejemplo, para IP la posibilidad más importante es la asignación dinámica de direcciones.

Capítulo 4

Las redes pueden dividirse en dos categorías: las que utilizan conexiones punto a punto y las de canales de difusión. Este capítulo trata las redes de difusión y sus protocolos. En cualquier red de difusión, el asunto clave es determinar quién puede utilizar el canal cuando hay competencia por él. Cuando únicamente hay un canal, determinar quién debería tener el turno es muy complicado. A veces, los canales de difusión se denominan **canales multiacceso** o **canales de acceso aleatorio**.

Los protocolos usados para determinar quién sigue en un canal multiacceso pertenecen a una subcapa de la capa de enlace de datos llamada **MAC** (Control de acceso al medio). Esta tiene especial importancia en las LANs (la mayoría usa un canal multiacceso).

1 El problema de asignación del canal

El tema central es la forma de asignar un solo canal de difusión entre usuarios competidores, primero se verán esquemas estáticos y dinámicos en general.

1.1 Asignación estática de canal en LANs y MANs

La manera tradicional de asignar un solo canal, como una troncal telefónica, entre varios usuarios competidores es la FDM. Se divide el ancho de banda en partes igual para todos los usuarios. No hay interferencia entre los mismos. Este es un mecanismo sencillo y eficiente.

Sin embargo cuando el número de emisores es grande y varía continuamente, o el tráfico es en ráfagas, FDM presenta algunos problemas. Si el espectro se divide en N regiones y hay menos de N usuarios interesados en comunicarse, se desperdiciará una buena parte del valioso espectro. Si más de N usuarios quieren comunicarse, a algunos de ellos se les negará el permiso por falta de ancho de banda, aún cuando algunos usuarios, con banda asignada, apenas transmitan o reciban algo. Aun con usuarios constantes, si algunos usuarios están inactivos, su ancho de banda simplemente se pierde, ya que nadie más puede usarlo; y en tráfico de sistemas de cómputo esto es corriente, ya que los datos se transmiten en ráfagas, por lo tanto, la mayoría de los canales estarán inactivos casi todo el tiempo. Los mismos argumentos se aplican para TDM.

1.2 Asignación dinámica de canales en LANs y MANs

Todo el trabajo hecho en esta área se basa en cinco supuestos clave:

1. **Modelo de estación.** Consiste en N estaciones (o terminales) independientes (PC, Teléfono, móvil, etc.), cada una con un programa que genera tramas para transmisión. Una vez generada una trama, la estación se bloquea y no hace nada sino hasta que la trama se ha transmitido con éxito.
2. **Supuesto de canal único.** Todas las estaciones pueden transmitir y recibir de él. A nivel *hardware*, todas las estaciones son equivalentes, aunque el *software* del protocolo puede asignarles prioridades.
3. **Supuesto de colisión.** Si dos tramas se transmiten en forma simultánea, se traslapan en el tiempo y la señal resultante se altera. Esto es una **colisión**. Todas las estaciones pueden detectarlas y deben retransmitirse. No hay otros errores excepto aquellos generados por las colisiones.
4. **Tiempo.**
 - a. **Tiempo continuo.** La transmisión de una trama puede comenzar en cualquier momento. No hay reloj maestro.
 - b. **Tiempo ranurado.** El tiempo se divide en intervalos (ranuras). La transmisión de las tramas siempre comienza al inicio de una ranura. Esta puede contener 0,1 o más tramas.
5. **Portadora.**
 - a. **Detección de portadora.** Las estaciones pueden saber si el canal está en uso; si es así, ninguna estación intentará utilizarlo hasta que regrese a inactividad.
 - b. **Sin detección de portadora.** Las estaciones no pueden detectar el canal, simplemente transmiten. Sólo después pueden determinar si la transmisión tuvo éxito.

El primer supuesto supone (de manera implícita) que cada estación sólo tiene un programa o usuario, si bien esto no es así ya que existen estaciones multiprogramadas, el análisis de estas es mucho más complejo. El supuesto de canal único es la esencia del modelo, al igual que el de colisión. Respecto a los supuestos de tiempo, cada sistema usa o es continuo o ranurado, al igual que la detección de portadora. Por lo general las LANs tienen detección de portadora, aunque en redes inalámbricas no se pueden utilizar de manera efectiva.

2 Protocolos de acceso múltiple

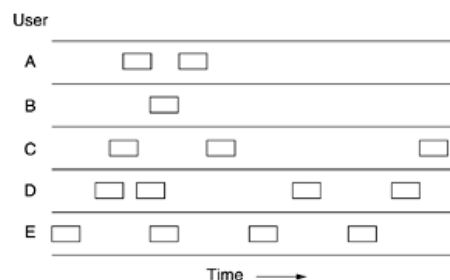
2.1 ALOHA

En los '70, Norman Abramson y colegas de la Universidad de Hawaii inventaron éste método que ha sido extendido por muchos investigadores. Las ideas básicas son aplicables a cualquier sistema de usuarios no coordinados que compiten por el uso del canal.

ALOHA Puro

Permite que los usuarios transmitan cuando tengan datos para enviar. Habrá colisiones y las tramas se dañarán. Mediante retroalimentación (escuchando el canal), el emisor puede saber si la trama fue destruida. Si no es posible escuchar, se necesitan confirmaciones de recepción. Si la trama fue destruida, se espera un tiempo aleatorio y se vuelve a enviar. Los sistemas en los cuales varios usuarios comparten un canal común, se conocen como sistemas de **contención**.

Se presenta un esbozo de la generación de tramas en un sistema ALOHA.



Cuando dos tramas traten de ocupar el canal al mismo tiempo, habrá una colisión y ambas se dañarán. Si el primer bit de una trama nueva se traslapa con el último bit de una trama casi terminada, ambas se destruirán por completo.

La eficiencia de una canal ALOHA se calcula mediante probabilidades, aplicando la distribución de Poisson, y resulta en una utilización efectiva del 18%, es decir calculando las posibilidades de colisión de las tramas y demás.

ALOHA ranurado

En 1972, Roberts publicó un método para duplicar la capacidad de un sistema ALOHA, dividiendo el tiempo en intervalos discretos. Este enfoque requiere que los usuarios acuerden límites de ranura que permiten lograr una sincronización. Se obliga a esperar el comienzo de una ranura para transmitir una trama.

Lo mejor que podemos esperar usando ALOHA ranurado es 37% de ranuras vacías, 37% de éxitos y 26% de colisiones.

2.2 Protocolos de acceso múltiple con detección de portadora

La detección de portadora permite a las estaciones detectar si el canal está en uso antes de transmitir una trama. Se presentan algunas versiones de protocolos de detección de portadora.

CSMA persistente y no persistente

CSMA (Acceso Múltiple con Detección de Portadora) persistente-1. Cuando una estación esta por transmitir, escucha el canal. Si se está transmitiendo en el canal, la estación espera hasta que se desocupa. Cuando está inactivo, la estación transmite una trama. Si ocurre una colisión, la estación espera un tiempo aleatorio y comienza nuevamente. Se llama "persistente-1" porque la estación transmite con una probabilidad de 1 cuando encuentra que el canal está inactivo.

El retardo de propagación tiene un efecto importante. Por ejemplo, una estación puede comenzar a transmitir con el canal inactivo, y otra estación, en otro extremo que todavía no recibe la señal, detectará el canal inactivo y comenzará a enviar también, lo que resultará en una colisión.

Con retardo de propagación cero, habrá colisiones también. Igualmente el protocolo tiene mejor desempeño que ALOHA puro y ranurado.

Un segundo protocolo de detección de portadora es el **CSMA no persistente**. En este, antes de enviar, la estación escucha el canal, si nadie está transmitiendo comienza a hacerlo. Si el canal esta en uso, no lo escucha de manera continua sino que espera

un tiempo aleatorio y repite el algoritmo. Conduce a un mejor uso del canal pero produce mayores retardos que el CSMA persistente-1.

El último protocolo es el **CSMA persistente-p**, que se aplica a canales ranurados. Cuando la estación esta lista para enviar, escucha el canal. Si está inactivo, transmite con probabilidad p . 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 . Este proceso se repite hasta que la trama se transmite o hasta que otra estación comienza a transmitir. En el segundo caso, espera un tiempo aleatorio y comienza de nuevo. Si al inicio la estación detecta que el canal está ocupado, espera hasta la siguiente ranura y aplica el algoritmo anterior.

CSMA con detección de colisiones

Si dos estaciones detectan que el canal está inactivo y comienzan a transmitir en forma simultánea, ambas detectarán la colisión casi de inmediato. En lugar de transmitir todas las tramas, deben detener rápidamente la transmisión, ahorrando tiempo y ancho de banda. Este protocolo es **CSMA/CD (Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones)**, se usa ampliamente en las LANs, en particular en la popular LAN Ethernet.

Las colisiones pueden detectarse comparando la potencia o el ancho de pulso de la señal recibida con el de la señal transmitida. Una vez detectada la colisión, la estación aborta la transmisión, espera un tiempo aleatorio e intenta nuevamente.

Es importante determinar el tiempo que tarda una estación en darse cuenta de la colisión ya que determina la longitud del período de contención, y por lo tanto, el retardo y la velocidad real de transporte. El tiempo mínimo para detectar la colisión es sólo el tiempo que tarda la señal para propagarse de una estación a otra. Se podría pensar que una estación que después de iniciar su transmisión no detecta colisiones ha “tomado” el cable, pero no es así. Suponiendo que t es el tiempo que tarda una señal en propagarse entre las dos estaciones más lejanas, en el peor de los casos, una estación no puede estar segura de que ha tomado el canal hasta que ha transmitido durante $2t$ sin detectar una colisión. Por lo tanto, se modela el intervalo de contención como un sistema ALOHA ranurado con un ancho de ranura de $2t$.

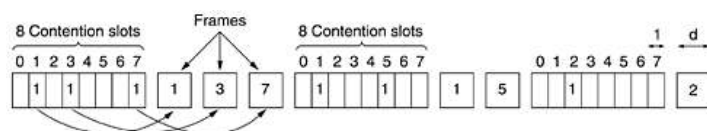
Es importante destacar que la detección de colisiones es un proceso analógico por lo que debe usarse una codificación especial (una colisión de dos señales de 0 voltios sería imposible de detectar). También vale la pena mencionar que una estación emisora debe monitorear de manera continua el canal en busca de ráfagas de ruido que puedan indicar una colisión, por ello, CSMA/CD es un sistema semidúplex. Se destaca que ningún protocolo de subcapa MAC garantiza la entrega confiable.

2.3 Protocolos libres de colisiones

Aunque en CSMA/CD las colisiones no ocurren una vez que una estación ha tomado sin ambigüedades el canal, aún pueden ocurrir durante el período de contención. Estas colisiones afectan el desempeño del sistema, especialmente en cableados y tramas cortas. Además CSMA/CD no es aplicable en todo el mundo. Se examinarán protocolos que resuelven la contención por el canal sin que haya colisiones, ni siquiera durante el período de contención. La mayoría de ellos no se utilizan actualmente en sistemas grandes. En todos los casos se suponen N estaciones numeradas desde 0 a $N-1$.

Un protocolo de mapa de bits

En el **método básico de mapa de bits** cada periodo de contención consiste en exactamente N ranuras. Cuando la estación j tienen una trama por enviar, transmite un bit 1 en la ranura j . Una vez que han pasado las N ranuras, cada estación sabe cuáles son todas las estaciones que quieren transmitir. En ese punto, las estaciones comienzan a transmitir en orden numérico.



Todos están de acuerdo en quien continúa por lo que nunca habrá colisiones. Una vez que la última estación lista haya transmitido su trama, evento que pueden detectar fácilmente todas las estaciones, comienza otro periodo de contención de N bits. Este tipo de protocolos en los que el deseo de transmitir se difunde antes de la transmisión se llaman **protocolos de reservación**.

Conteo descendente binario

Un problema básico del protocolo anterior es que no se escala bien en redes con miles de estaciones. Podemos tener mejores resultados usando direcciones de estación binarias. Una estación que quiere utilizar el canal ahora difunde su dirección como una cadena binaria de bits, comenzando por el bit de orden mayor. Todas las direcciones tienen la misma longitud. A los bits en cada posición de dirección de las diferentes estaciones se les aplica un OR BOOLEANO, a todos juntos. Para evitar conflictos, una vez que una estación ve que una posición de bit de orden alto, que en su dirección es 0, ha sido sobrescrita con un 1, se da por vencida.

Si el formato de trama se escoge ingeniosamente, la eficiencia puede alcanzar el 100%. Este es un protocolo sencillo, elegante y eficiente que está esperando a ser redescubierto.

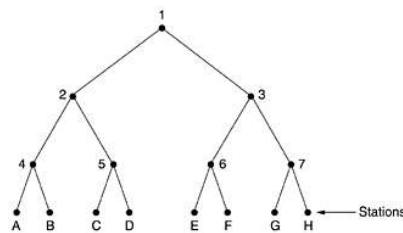
2.4 Protocolos de contención limitada

Hasta el momento se han considerado dos estrategias básicas de adquisición de canal: los métodos por contención (realmente eficientes con cargas bajas) y los libres de colisión (más eficientes con cargas altas). Para aprovechar las ventajas que brinda cada una de estas estrategias según el nivel de carga, existen los **protocolos de contención limitada**. Estos protocolos son asimétricos.

Estos protocolos primero dividen las estaciones en grupos. Sólo los miembros del grupo j pueden competir por la ranura j , 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 $j+1$ compiten por la ranura $j+1$, etcétera. El truco está en cómo asignar las estaciones a las ranuras. Se necesita una manera dinámica de asignar las estaciones a las ranuras, con muchas estaciones por ranura cuando la carga es baja y pocas estaciones por ranura cuando la carga es alta.

Protocolo de recorrido de árbol adaptable

Se considera a las estaciones como hojas de un árbol binario.



En la ranura 0, luego de una transmisión satisfactoria, se permite que todas las estaciones intenten adquirir el canal. Si una lo logra, hay éxito. Si hay una colisión, entonces, durante la ranura 1, sólo aquellas estaciones que queden bajo el nodo 2 del árbol podrán competir. Si alguna de ellas adquiere el canal, la ranura que sigue a la trama, se reserva para las estaciones debajo del nodo 3. En cambio, si dos o más estaciones bajo el nodo 2 quieren transmitir, habrá una colisión durante la ranura 1, en cuyo caso es el turno del nodo 4 durante la ranura 2. En esencia, cada ranura de bits está asociada a un nodo en particular, si ocurre una colisión, continúa la búsqueda recursivamente con los hijos izquierdo y derecho del nodo.

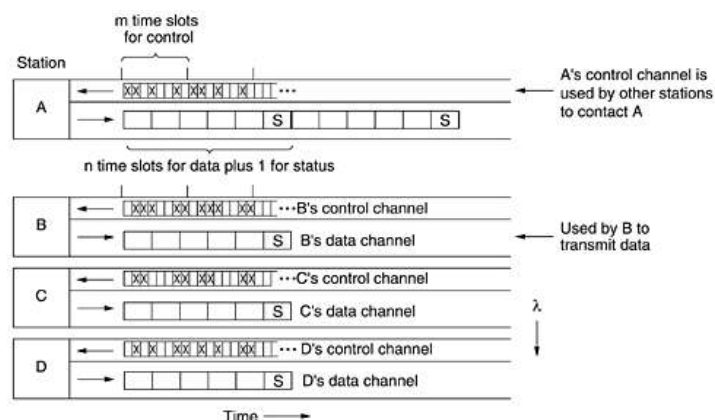
Cuando la carga es pesada apenas vale la pena dedicarle la ranura 0 al nodo 1, porque es poco probable de que solo una estación tenga una trama para enviar. De manera similar para los nodos 2 y 3. Por lo tanto, a mayor carga, la búsqueda debe comenzar más abajo en el árbol.

2.5 Protocolos de acceso múltiple por división de longitud de onda

El objetivo es dividir el canal usando FDM, TDM o ambas, y asignarlos de manera dinámica según las necesidades. Por lo general estos esquemas se utilizan en LANs de fibra óptica. Una manera sencilla de construir una LAN completamente óptica es dividir es utilizar un acoplador pasivo en estrella.

Para permitir múltiples transmisiones al mismo tiempo, se divide el espectro en canales. En el protocolo **WDMA (Acceso Múltiple por División de Longitud de Onda)**, se asignan dos canales a cada estación: un canal estrecho como control para señalar la estación y uno ancho para enviar tramas de datos.

Cada canal se divide en grupos de ranuras de tiempo:



La última ranura del canal de datos es usada por la estación para informar su estado. Los canales se sincronizan con un solo reloj global. El protocolo reconoce 3 clases de tráfico: (1) orientado a la conexión con tasa de datos constante, (2) orientado a la conexión con tasa de datos variable y (3) tráfico de datagramas, como paquetes UDP. En los orientados a la conexión, uno de los extremos debe solicitar la conexión en una ranura libre del canal de control del otro extremo. Si se acepta, se lleva a cabo por el canal de datos del llamador.

Cada estación tiene dos emisores y dos receptores:

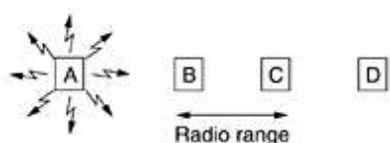
1. Un receptor de longitud de onda fija para escuchar su propio canal de control
2. Un emisor sintonizable para enviar por el canal de control de otra estación
3. Un emisor de longitud de onda fija para la salida de tramas de datos
4. Un receptor sintonizable para seleccionar al emisor de datos a escuchar

Cada estación escucha en su propio canal de control las solicitudes que llegan, pero tiene que sintonizarse a la longitud de onda del emisor para obtener los datos.

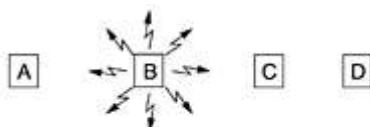
Hay variantes del protocolo, como por ejemplo, compartir un solo canal de control entre todas las estaciones.

2.6 Protocolos de LANs inalámbricas

Las LANs inalámbricas requieren protocolos de subcapa MAC especiales. En nuestros análisis haremos la suposición de simplificación de que todos los emisores de radio tienen algún alcance fijo. Cuando un receptor está dentro del alcance de dos emisores activos, la señal resultante por común se altera y resulta inútil. No se considerarán sistemas tipo CDMA en este análisis. Es importante notar que en algunas LANs inalámbricas no todas las estaciones están dentro del alcance de todas las demás. Se podría intentar utilizar CSMA (escuchar si hay otras transmisiones), pero este protocolo no es adecuado porque lo que importa es la interferencia en el receptor, no en el emisor.



En este caso A está transmitiendo a B. Si C detecta el medio, no podrá escuchar a A porque está fuera de su alcance, y deducirá falsamente que puede transmitir a B, lo que generara interferencias eliminando la trama de A. Este problema de que una estación no puede detectar a un competidor potencial por el medio, puesto que dicho competidor está demasiado lejos se denomina **problema de estación oculta**.

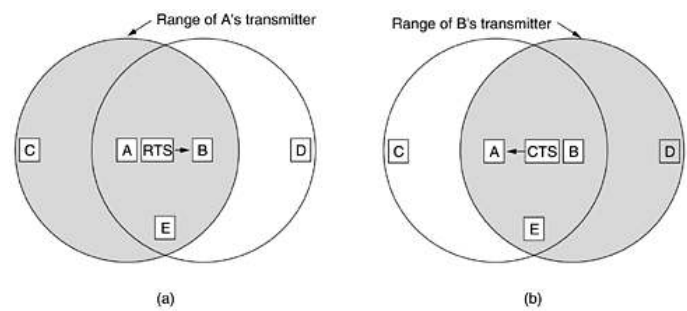


Acá B está transmitiendo a A. Si C detecta el medio, escuchará una transmisión y concluirá equivocadamente que no puede enviar a D, cuando esa transmisión causaría una mala recepción solo en la zona entre B y C, en la que no está localizado ninguno de los receptores pretendidos. Esto se denomina **problema de estación expuesta**.

MACA y MACAW

MACA (Acceso Múltiple con Prevención de Colisiones) es uno de los primeros protocolos diseñados para LANs inalámbricas. El emisor estimula al receptor a enviar una trama corta para que las estaciones cercanas puedan detectar esta transmisión y evitar ellas mismas hacerlo durante la siguiente trama de datos (grande).

Ejemplo A envía una trama **RTS** (Solicitud de envío) a B. Esta trama de 30 bytes contiene la longitud de la trama de datos que seguirá. B contesta con una trama **CTS** (Libre para envío) que también contiene la longitud de los datos. Una vez recibida por A, ésta comienza a transmitir.



Cualquier estación que escuche el RTS está bastante cerca de A y debe permanecer en silencio durante el tiempo suficiente para que el CTS se transmita de regreso. Cualquier estación que escuche el CTS está bastante cerca de B y debe permanecer en silencio durante la transmisión de datos (puede determinar la longitud examinando la trama CTS). Por lo tanto C, mientras no interfiera con el CTS, está libre para transmitir mientras se está enviando la trama de datos. En cambio, D, no escucha el RTS pero si el CTS, por lo que sabe que una estación está a punto de recibir una trama, por lo que difiere el envío de cualquier cosa hasta el momento que se espera termine la transmisión de esa trama. E escucha ambos mensajes de control y debe comportarse como D.

Aun así pueden ocurrir colisiones: B y C podrían enviar tramas RTS a A al mismo tiempo, logrando una colisión. Los emisores deberán esperar un tiempo aleatorio y reintentar.

El MACA fue mejorado y se obtuvo el **MACAW** (MACA Inalámbrico). Se noto que sin confirmación de recepción de la capa de enlace de datos, las tramas no eran retransmitidas sino hasta que la capa de transporte notaba su ausencia, mucho después. Se resolvió introduciendo una trama ACK tras cada trama exitosa. También se agregó CSMA para detección de portadora para evitar que una estación transmita un RTS al mismo tiempo y destino que otra estación cercana. También se agregaron mecanismos para que las estaciones intercambiaran información sobre congestiones.

3 Ethernet

Tanto 802.3 como 802.11 tienen diferentes capas físicas y diferentes subcapas MAC, pero convergen en la misma subcapa de control lógico del enlace, por lo que tienen la misma interfaz a la capa de red.

3.1 Cableado Ethernet

Comúnmente se usan 4 tipos de cableado:

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

Notación

El primer número es la velocidad en Mbps. Después viene la palabra "Base" que indica la transmisión de banda base, solía haber una variante para banda ancha, 10Broad35 que desapareció. Por último, si el medio es coaxial, su longitud se da redondeada a unidades de 100 m.

El cable **10Base5** (Ethernet grueso) se asemeja a una manguera de jardín amarilla. Las conexiones a él se hacen usando **derivaciones vampiro**, en las que se introduce *cuidadosamente* una punta hasta la mitad del núcleo del cable coaxial.

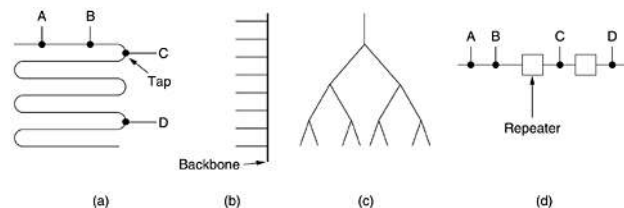
El **10Base2** (Ethernet delgado), se dobla con facilidad. Las conexiones se hacen usando conectores BNC para formar uniones T. Estos son más fáciles de usar y más confiables. Es más económico y fácil de instalar.

La detección de ruptura de cable, derivaciones malas o conectores flojos puede ser un problema importante en ambos medios. Mediante técnicas como la **reflectometría en el dominio del tiempo** (se envía un pulso y se cronometra la recepción de eco) pueden detectarse. Por estos inconvenientes se evolucionó al patrón de cableado de **concentrador (hub)**, en el que se conectan de manera eléctrica los cables pares trenzados telefónicos. Este esquema se llama **10Base-T**. Los concentradores no almacenan en el búfer el tráfico de entrada. Agregar o remover estaciones es más sencillo con esta configuración, ya que cada estación está conectada al concentrador mediante un cable dedicado (no compartido). La desventaja es la longitud máxima de 100m que puede llevarse a 200m utilizando cable de par trenzado de alta calidad (categoría 5).

Una cuarta opción es **10Base-F**. Es una alternativa cara debido al costo de los conectores y terminadores pero tiene excelente inmunidad contra el ruido. También ofrece buena seguridad ya que es difícil intervenir una conexión de fibra.

En todos los casos, para permitir redes mayores, se pueden conectar múltiples cables mediante **repetidores**.

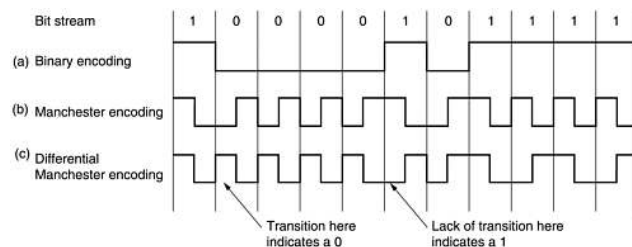
Hay diferentes maneras de cablear un edificio, la topología más general es en árbol.



3.2 Codificación Manchester

Ninguna de las versiones de Ethernet utiliza codificación binaria directa con 0 voltios para un bit 0 y 5 voltios para un bit 1, pues conduce a ambigüedades. Para evitar las ambigüedades se necesitan mecanismos sin necesidad de un reloj externo. Dos de tales enfoques son **codificación Manchester** y **codificación Manchester diferencial**. En la primera, cada periodo de bit se divide en dos intervalos iguales. Un bit 1 binario se envía teniendo el voltaje alto durante el primer intervalo y bajo durante el segundo. Un 0 binario es lo inverso: primero bajo y después alto. Asegura que cada periodo de bit tenga una transición a la mitad, facilitando la sincronización. La desventaja es que requiere el doble de ancho de banda. Todos los sistemas Ethernet utilizan Manchester.

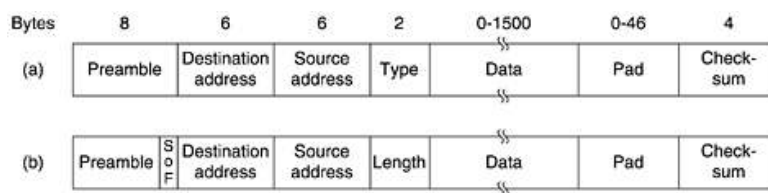
La codificación Manchester diferencial es una variación. Un bit 1 se indica mediante la ausencia de una transición al inicio del intervalo. Un bit 0 se indica mediante la presencia de una transición al inicio del intervalo. En ambos casos hay también una transición a la mitad. Requiere equipo más complejo pero ofrece mejor inmunidad al ruido.



La señal alta es de + 0.85 voltios y la baja es de - 0.85 voltios.

3.3 El protocolo de subcapa MAC de Ethernet

Se presenta la estructura de trama original de DIX (DEC, Intel, Xerox). Inicia con **Preámbulo de 8 bytes**, que contiene el patrón 10101010 que produce (por Manchester) una onda cuadrada de 10 MHz para 6.4 μseg que permite que el reloj del receptor se sincronice con el del emisor. Contiene **dos direcciones**, una para destino y otra para origen. Pueden ser **de 2 y 6 bytes**, pero el estándar de banda base de 10 Mbps usa sólo de 6 bytes. El **bit de orden mayor** de la dirección de destino es 0 para direcciones ordinarias y **1 para direcciones de grupo** (para realizar *multicast* y *broadcast*). Otra característica interesante es el empleo de bit 46 (adyacente al bit de orden mayor) para distinguir las direcciones locales (asignadas por el administrador de red) de las globales (asignadas por el IEEE en todo el mundo).



(a) Ethernet DIX - (b) IEEE 802.3

Luego está el campo **Tipo**, que indica al receptor qué hacer con la trama. El *kernel* debe saber a qué proceso entregar la trama, ya que existen múltiples protocolos en la capa de red. Después siguen los **datos** de hasta **1500 bytes**. Además hay una longitud mínima que de 64 bytes para toda la trama, por lo que cuando la carga útil no logra que la longitud total llegue a 64 bytes, se utiliza el **Relleño** de hasta 46 bytes. La razón es 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. A medida que aumenta la velocidad de la red, la longitud mínima de la trama debe aumentar o la longitud máxima del cable debe disminuir, de manera proporcional. Para una LAN de 2500 m, a 1 Gbps, el tamaño mínimo tendría que ser de 6400 bytes.

El campo final de Ethernet es la **Suma de verificación**, un código hasta de 32 bits de los datos. Sirve para detección de errores, no corrección hacia adelante.

Cuando el IEEE estandarizó Ethernet, realizó dos cambios al formato DIC. El primero fue reducir el preámbulo a 7 bytes, y utilizar el último byte para un delimitador de **Inicio de trama**, para compatibilidad con 802.4 y 802.5. El segundo fue cambiar el campo

de *Tipo* en un campo de **Longitud**. El *Tipo* se resolvió con un pequeño encabezado en la porción de datos. En la época en que se publicó el 802.3, Ethernet DIX ya era ampliamente utilizado, por lo que este último cambio era difícil. En 1997, el IEEE dijo que las dos formas se ajustaban bien. Por fortuna, todos los campos de *Tipo* en uso antes de 1997 eran más grandes que 1500. En consecuencia, cualquier número menor o igual que 1500 puede interpretarse como *Longitud* y si es mayor como *Tipo*.

3.4 Algoritmo de retroceso exponencial binario

Se analiza cómo se efectúa el proceso de aleatorización cuando ocurre una colisión. Tras una colisión, el tiempo se divide en ranuras discretas cuya longitud es igual al tiempo de propagación de ida y vuelta de peor caso en el cable. Tomando en cuenta la ruta más larga permitida en Ethernet, el tiempo de ranura se estableció en 512 tiempos de bit o 51,2 μ seg. Tras la primera colisión, cada estación espera 0 o 1 tiempos e intenta nuevamente. Si vuelve a colisionar, escoge 0,1,2 o 3 al azar y espera. Si vuelve a colisionar escoge al azar del intervalo 0 a $2^3 - 1$. En general, tras i colisiones, se escoge un número entre 0 y $2^i - 1$. Luego de 10 colisiones, el intervalo se congela en 1023 ranuras. Tras 16 colisiones, se informa el fracaso al sistema y la recuperación es responsabilidad de las capas superiores.

3.5 Desempeño de Ethernet

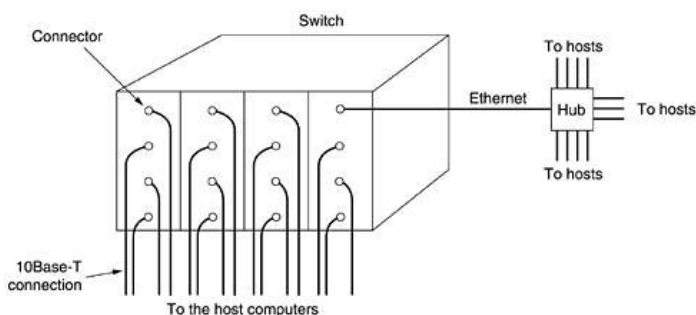
- Cuanto mayor sea la longitud del cable, mayor será el intervalo de contención, por ello Ethernet especifica una longitud máxima.
- Cuando se aumenta el ancho de banda o la distancia de red, reduce la eficiencia de una trama de tamaño dado.
- Ethernet no es el mejor sistema para sistemas de gran ancho de banda y grandes distancias.
- La gran cantidad análisis teóricos sobre el desempeño de Ethernet ha supuesto que el tráfico es Poisson, pero nuevos análisis han determinado que pocas veces es así.

3.6 Ethernet conmutada

El corazón de este sistema es el **conmutador** (*switch*) que contiene una matriz de conmutación de alta velocidad y espacio (típicamente) para 4 a 32 tarjetas de línea, cada una de las cuales contiene de uno a ocho conectores. Lo más común es que cada conector tenga una conexión de cable de par trenzado 10Base-T a una sola computadora *host*.

Cuando una estación quiere transmitir una trama, la envía al conmutador. Este la revisa para ver si está destinada a una de las otras estaciones conectadas a la misma tarjeta. Si es así, la trama se copia ahí, sino se envía a través de la matriz de conmutación de alta velocidad (1 Gbps).

El manejo de colisiones depende de la construcción de la tarjeta. Por ejemplo, cada tarjeta podría formar su propio **dominio de colisión**, independiente de los demás, y funcionar como una red CSMA/CD. Otro tipo de tarjeta, utiliza un búfer por cada puerto de entrada. Esto permite que cada puerto opere en dúplex y todos en paralelo. Con este diseño, cada puerto es un dominio de colisión independiente. En muchos casos, la velocidad real de transporte real del sistema puede aumentarse en un orden de magnitud respecto al 10Base5 que tiene un solo dominio de colisión para todo el sistema. Dado que el conmutador solo espera tramas Ethernet estándar en cada puerto de entrada, es posible utilizar algunos de los puertos como concentradores. En la figura se conecta un concentrador de 12 puertos en la esquina superior derecha. A medida que llegan las tramas al concentrador, luchan por el canal de la manera usual. Las tramas que tienen éxito llegan al conmutador y ahí se tratan como cualquier otra trama de entrada conmutando a la línea de salida correcta a través de la matriz de conmutación de alta velocidad.



En la figura se conecta un concentrador de 12 puertos en la esquina superior derecha. A medida que llegan las tramas al concentrador, luchan por el canal de la manera usual. Las tramas que tienen éxito llegan al conmutador y ahí se tratan como cualquier otra trama de entrada conmutando a la línea de salida correcta a través de la matriz de conmutación de alta velocidad.

3.7 Fast Ethernet

Para aumentar la velocidad, varios grupos de la industria propusieron dos nuevas LANs ópticas basadas en anillos. Una se llamó **FDDI (Interfaz de Datos Distribuidos por Fibra)** y la otra **Canal de fibra**. Ambas se utilizaban como redes dorsales, pero en ambos casos la administración de estaciones era muy complicada y tenía precios altos, por lo que nunca se popularizó en sistemas de escritorio. El IEEE convocó al comité del 802.3 en 1992 para hacer un estándar más rápido. Paralelo a ello se creó el 802.12 que fracasó rotundamente. Se eligió mejorar el 802.3 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

El resultado fue el **802.3u**, conocido como **Fast Ethernet**. La idea fue sencilla: mantener todos los formatos anteriores, interfases y reglas de procedimientos, y solo reducir el tiempo de bits de 100 nseg a 10 nseg. Las ventajas del cableado 10Base-T hicieron que se desestimara utilizar 10Base-5 o 10Base-2.

Una de las decisiones más importantes fue elegir el cableado. Se quería soporte para cable par trenzado categoría 3 ya que prácticamente todas las oficinas en el mundo occidental tienen por lo menos cuatro cables de par trenzado categoría tres (o mejor), por lo tanto ahorraría cablear en varios casos. La principal desventaja del categoría 3 es su incapacidad de llevar señales de 200 megabaudios (100 Mbps con Manchester) a una distancia de hasta 100 metros. En contraste, el categoría 5 puede manejar 100 metros con facilidad y la fibra puede ir mucho más rápido. La solución fue permitir las tres posibilidades:

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

100Base-T4 utiliza una velocidad de señalización de 25 Mhz, tan sólo 25 por ciento más rápida que los 20 MHz de la Ethernet estándar. Por ello utiliza cuatro cables de par trenzado para alcanzar los 100 Mbps: uno siempre va al concentrador, el otro sale del concentrador y los dos restantes son intercambiables a la dirección actual de transmisión. No se utiliza Manchester, se utilizan señales ternarias (0,1 o 2). Con tres cables de par trenzado y la señalización ternaria, se puede transmitir cualquier de 27 símbolos posibles, con lo que se pueden enviar 4 bits con algo de redundancia, que por 25 Mhz, nos da los 100 Mbps necesarios. Además, siempre hay un canal de regreso de 33.3 Mbps. El esquema utilizado se conoce como **8B/6T** (8 bits se convierten en 6 tris).

Para el cableado UTP cat 5, se diseñó **100Base-TX**. Estos cables manejan velocidad reloj de 125 MHz. Sólo se utilizan dos cables de par trenzado por estación (uno para enviar y otro para recibir). La codificación binaria directa no se utiliza, se toma un esquema **4B/5B** tomando de las redes FDDI y compatible con ellas. Hay 32 combinaciones, 16 se usan para transmitir los cuatro grupos de bits 0000,0001,0010, ..., 1111; los 16 restantes se utilizan para propósitos de control, como el marcado de límites de tramas. Las combinaciones utilizadas se eligieron cuidadosamente para mantener sincronización de reloj. El sistema 100Base-TX es de dúplex total, transmisión y recepción a 100 Mbps. Con frecuencia, 100Base-TX y 100Base-T4 se llaman en conjunto **100Base-T**.

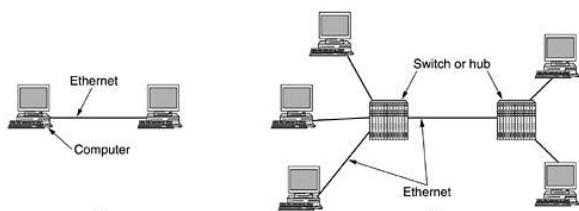
100Base-FX utiliza dos filamentos de fibra multimodo, una para cada dirección, por lo que también es dúplex total con 100 Mbps en cada dirección. La distancia entre estación y concentrador puede ser hasta 2 km. En 1997, el comité 802 agregó un nuevo tipo de cableado, **100Base-T2**, que permite que la Fast Ethernet se ejecute a través de dos pares de cables existentes de categoría 3. Es complejo y costoso, por lo tanto su uso es inusual.

Con 100Base-T son posibles dos tipos de dispositivos de interconexión: concentradores y conmutadores. En el concentrador todas las líneas entrantes se conectan lógicamente formando un solo dominio de colisión. Se aplican las reglas estándar (como el algoritmo de retroceso exponencial binario), es decir que funciona de la misma manera que la Ethernet antigua, una estación a la vez, por lo tanto, los concentradores requieren comunicación semidúplex. En un conmutador las tramas entrantes se almacenan en el búfer y pasan a través de una matriz de conmutación de alta velocidad. Los concentradores no están permitidos con 100Base-FX. Casi todos los conmutadores pueden manejar una mezcla de estaciones de 10 y 100 Mbps para facilitar la actualización, de hecho, el estándar proporciona una forma para que dos estaciones negocien la velocidad óptima (10 o 100 Mbps) y el tipo de transmisión dúplex (semi o total).

3.8 Gigabit Ethernet

En 1995 el comité 802 comenzó a trabajar en una internet aún más rápida. Se conoció como **Gigabit Ethernet (802.3z)**. Los objetivos fueron, aumentar (otra vez) 10 veces la velocidad con compatibilidad hacia atrás. También, ofrecer el servicio de datagramas sin confirmación de recepción con difusión y multidifusión, utilizar el esquema de direccionamiento de 48 bits y mantener el mismo formato de trama, incluyendo los tamaños mínimo y máximo de trama. Todas las configuraciones de Gigabit Ethernet son de punto a punto. En la configuración más simple dos computadoras están conectadas entre sí. Sin embargo, el caso más común es tener un conmutador o un concentrador conectado a múltiples computadoras y posiblemente a

conmutadores o concentradores adicionales. En ambas configuraciones, cada cable Ethernet individual tiene exactamente dos dispositivos, ni más ni menos. Soporta dos modo normal de dúplex total y el semidúplex. En **modo dúplex total**, se utiliza un conmutador central conectado a computadoras (u otros conmutadores) en el periférico. El emisor no tiene que detectar el canal, ya que en la línea entre una computadora y un conmutador, la computadora es el único emisor posible en esa línea y el



conmutador puede estar enviando al mismo tiempo ya que es dúplex total. Los conmutadores son libres de mezclar e igualar velocidad. La autoconfiguración es soportada al igual que en Fast Ethernet. El **modo semidúplex** se utiliza con computadoras conectadas a concentradores. Este conecta las líneas internamente en forma eléctrica (no hay búfers). En este modo las colisiones son posible por lo que se adopta el

protocolo CSMA/CD estándar. Puesto que se transmite 100 veces más rápido que la Ethernet clásica, se tuvo que especificar un nuevo tamaño mínimo de trama (sino la longitud máxima del cable sería de 25 m). Se agregaron dos características, la primera, llamada **extensión de portadora**, se encarga de agregar relleno a la trama para extenderla a 512 bytes. Este relleno es agregado por el hardware emisor y eliminado por el hardware receptor. La segunda característica, llamada **ráfagas de trama**, permite que un emisor transmita una secuencia concatenada de múltiples tramas en una sola transmisión. Si la ráfaga total es menor que 512 bytes, el hardware la rellena nuevamente.

Gigabit Ethernet soporta tanto el cableado de fibra óptica como el cobre. Transmitir señales a 1 Gbps no es posible con LEDs porque no pueden encenderse y apagarse en 1 nseg, se necesitan láseres con longitud de onda de 0.85 micras o 1.3 micras. Los láseres a 0.85 micras son más económicos pero no funcionan en una fibra de modo sencillo.

Se permiten tres diámetros de fibra 10,50 y 62,5 micras. El primero para modo sencillo y los otros para multimodo. La distancia máxima depende de la combinación que se utilice.

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

Utiliza nuevas reglas de codificación en las fibras. Se eligió un nuevo esquema, llamado **8B/10B** que se basa en un canal de fibra. Cada byte de 8 bits está codificado en la fibra como 10 bits. Hay 1024 palabras codificadas posibles, por lo que se utilizaron las siguientes dos reglas para elegir las permitidas:

1. Ninguna palabra podría tener más de cuatro bits idénticos en una fila.
2. Ninguna palabra podría tener más de seis bits 0 o seis bits 1.

De esta manera se mantienen suficientes transiciones en el flujo para asegurarse de que el receptor continúe sincronizando con el emisor y también para mantener la cantidad de bits 0 y bits 1 en la fibra tan cerca del equilibrio como sea posible. Muchos bytes tienen dos palabras codificadas posibles asignadas a ellos.

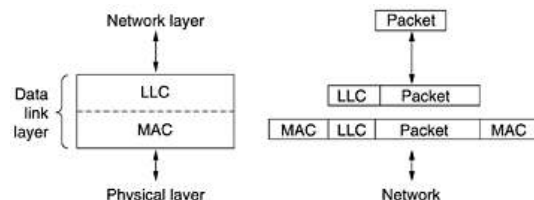
1000Base-T utiliza un esquema de codificación diferente. Esta solución utiliza cuatro cables de par trenzado categoría 5 para permitir cuatro símbolos en paralelo. Cada uno de ellos se codifica utilizando un de cinco niveles de voltaje. Por lo tanto, hay 2 bits de datos por cable de par trenzado y 8 bits de datos por ciclo de reloj. Los cinco niveles de voltaje permiten combinaciones sobrantes para propósitos de entramado y control.

Como la velocidad es realmente alta y se puede interactuar con Ethernet más antiguas, hay grandes probabilidades de saturar búfers, por lo que Gigabit Ethernet soporta control de flujo mediante el envío de tramas de control especiales al otro extremo, indicando que se detenga por un tiempo.

3.9 Estándar IEEE 802.2: control lógico de enlace

Las Ethernet y los protocolos 802 ofrecen un servicio de datagramas de mejor esfuerzo, que muchas veces es adecuado. Sin embargo, también hay sistemas en los que se desea un protocolo de enlace de datos con control de errores y de flujo. El IEEE definió el **LLC (Contról lógico del enlace)** que opera encima de los protocolos Ethernet y 802, proporcionando un formato único y una interfaz con la capa de red. El LLC forma la mitad superior de la capa de enlace de datos, con la subcapa MAC por debajo.

El uso típico es: la capa de red emisora pasa un paquete al LLC usando sus primitivas. 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 receptor ocurre el proceso inverso.



Proporciona tres servicios: 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: un punto de acceso de destino, un punto de acceso de origen y un campo de control. Los puntos de acceso indican de cuál proceso proviene la trama y en donde se va a enviar, reemplazan el campo de *Tipo DIX*. El campo de control contiene números de secuencia y de confirmación de recepción. Para Internet, los intentos de mejor esfuerzo son suficientes para enviar paquetes IP, por lo que no se utilizan confirmaciones en el nivel LLC.

3.10 Retrospectiva de Ethernet

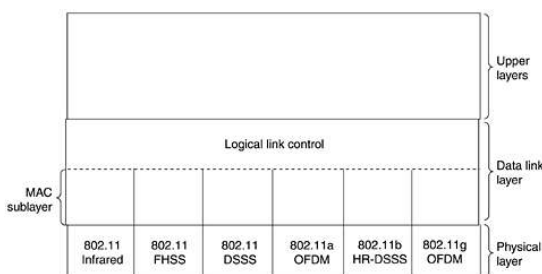
No se resume.

4 LANs Inalámbricas

El estándar 802.11 prevé dos tipos de conexión: a estación base y sin estación base. Se verán la pila de protocolos, las técnicas de transmisión de radio de la capa física, el protocolo de la subcapa MAC, la estructura de trama y los servicios.

4.1 La pila de protocolos

Los protocolos utilizados por todas las variantes del 802 tienen similitudes en su estructura. En este caso, la subcapa MAC determina la forma en que se asigna el canal (a quién toca transmitir). El estándar 802.11 especifica tres técnicas de transmisión en la capa física. El método de infrarrojos con tecnología similar a los controles remotos, y dos métodos que utilizan radio de corto alcance (FHSS y DSSS). Éstas utilizan parte del espectro que no necesita licencia (la banda ISM de 2.4 GHz). Todas éstas técnicas funcionan a 1 o 2 Mbps y con poca energía por lo que no interfieren mucho entre sí. En 1999 se agregaron OFDM (54 Mbps) y HRDSSS (11 Mbps). En 2001 se introdujo una segunda modulación OFDM que funciona en una banda de frecuencia diferente. Técnicamente pertenecen a la capa física.



4.2 La capa física

La opción de **infrarrojos** utiliza transmisión difusa (no requiere línea visual) a 0.85 o 0.95 micras. Permite dos velocidades 1 y 2 Mbps. A 1 Mbps utiliza un esquema de codificación en el cual un grupo de 4 bits codifica una palabra de 16 bits, que contiene quince 0s y un 1, mediante **código de Gray**. Este código tiene la propiedad de que un pequeño error en la sincronización lleva a un solo error de bits en la salida. A 2 Mbps, toma 2 bits y produce una palabra codificada de 4 bits, también con un solo 1 (0001, 0010, 0100 o 1000). Las señales no penetran paredes. Esta no es una opción popular.

FHSS (Espectro Disperso con Salto de Frecuencia) utiliza 79 canales, cada uno con un ancho de banda de 1 MHz. Para los saltos utiliza un generador de números pseudoaleatorios. Todas las estaciones que utilicen la misma semilla y estén sincronizadas, saltarán de igual manera. El tiempo de permanencia en frecuencia es un parámetro ajustable aunque debe ser menor a 400 mseg. Proporciona una forma justa de asignar espectro en la banda ISM no regulada y algo de seguridad. En distancias grandes, el desvanecimiento de múltiples rutas puede ser un problema. Es relativamente insensible a la interferencia de radio, lo que lo hace popular para enlaces de edificio a edificio. Su principal desventaja es su bajo ancho de banda.

DSSS (Espectro Disperso de Secuencia Directa) también está restringido a 1 o 2 Mbps. Su esquema es similar a CDMA. Cada bit se transmite como 11 *chips*, utilizando la **secuencia Barker**. Utiliza modulación por desplazamiento de fase a 1 Mbaudio y transmite 1 bit por baudio (logrando 1 Mbps) o 2 bits por baudio (2 Mbps).

La primera de las LANs Inalámbricas de alta velocidad, **802.11a**, utiliza **OFDM (Multiplexión por División de Frecuencias Ortogonales)** para enviar hasta 54 Mbps en la banda ISM más ancha de 5 GHz. Mediante FDM se dividen las 52 frecuencias en 48 para datos y 4 para sincronización, al igual que ADSL. Esta técnica se considera una forma de espectro disperso diferente a CDMA y FHSS. Las bandas estrechas permiten utilizar bandas contiguas con poca interferencia. Utiliza un sistema de codificación complejo, mediante modulación por desplazamiento de fase para velocidades de hasta 18 Mbps y QAM para velocidades mayores. A 54 Mbps se codifican 216 de datos en símbolos en 288 bits.

HR-DSSS (Espectro Disperso de Secuencia Directa de Alta Velocidad) utiliza 11 millones de chips/seg para alcanzar 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz. Es el **802.11b**. Soporta velocidades de 1, 2, 5.5 y 11 Mbps. En las dos tasas más bajas utiliza modulación por desplazamiento de fase, en las dos más rápidas utilizan códigos **Walsh/Hadamard**. La tasa de datos puede ser adaptada dinámicamente durante la operación para alcanzar la velocidad más óptima posible. Aunque es más lento que 802.11a, su rango es aproximadamente 7 veces mayor, lo que es más importante en muchas situaciones.

En 2001, se aprobó **802.11g** (versión mejorada de 802.11b). Utiliza el método de modulación OFDM 802.11a, pero opera en la banda de 2.4 GHz junto con 802.11b. En teoría puede operar hasta 54 Mbps.

4.3 El protocolo de la subcapa MAC

Es muy diferente al de Ethernet. Por empezar existe el problema de la estación oculta y el de la estación expuesta. Y además, la mayoría de los radios son semidúplex, por lo que no pueden transmitir y escuchar ráfagas de ruido al mismo tiempo en una sola frecuencia, es imposible utilizar CSMA/CD. Para solucionar este problema hay dos modos de funcionamiento: **DCF** que no utiliza ningún tipo de control central, y **PCF** que utiliza la estación base para controlar toda la actividad en su celda. Todas las implementaciones soportan DCF; PCF es opcional.

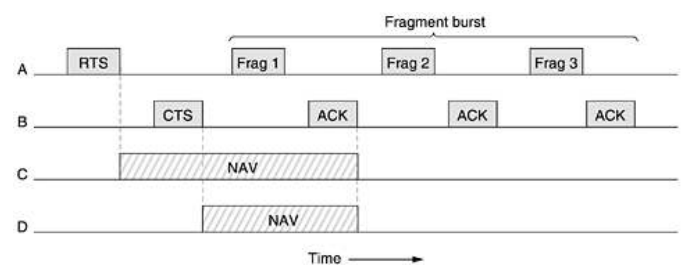
DCF (Función de Coordinación Distribuida)

Utiliza un protocolo CSMA/CA (CSMA con Evitación de Colisiones). Utiliza detección de canal físico y virtual.

- En el primer método, cuando una estación desea transmitir, detecta el canal, si está inactivo comienza a transmitir. Mientras transmite no detecta el canal pero emite su trama completa (podría ser destruida por interferencia). Si el canal está ocupado espera a que este inactivo. Si ocurre una colisión, las estaciones esperan un tiempo aleatorio mediante el retroceso exponencial binario.
- El otro modo de operación CSMA/CA se basa en MACAW y utiliza la detección de canal virtual. En caso de que cualquier estación escuche una señal RTS o CTS, que no va dirigida hacia ella, se impone un tipo de canal virtual ocupado, indicado por **NAV** (Vector de Asignación de Red), desistiendo de transmitir cualquier cosa hasta que el intercambio entre las otras estaciones esté completo.

Las redes inalámbricas son ruidosas e inestables, por lo que la probabilidad de que una trama llegue a su destino se decrementa con la longitud de la trama. Si una trama es demasiado grande, tiene muy pocas probabilidades de pasar sin daño y tendrá que retransmitirse. Para solucionar este inconveniente se dividen las tramas en fragmentos, cada uno con su propia suma de verificación y numeración. Su recepción se confirma utilizando parada y espera.

Una vez adquirido el canal con RTS y CTS, puede enviarse una **ráfaga de fragmentos**. El tamaño del fragmento no lo fija el estándar pero es un parámetro que ajusta la estación base. NAV mantiene otras estaciones en silencio sólo hasta la siguiente confirmación de recepción.



PCF (Función de Coordinación Puntual)

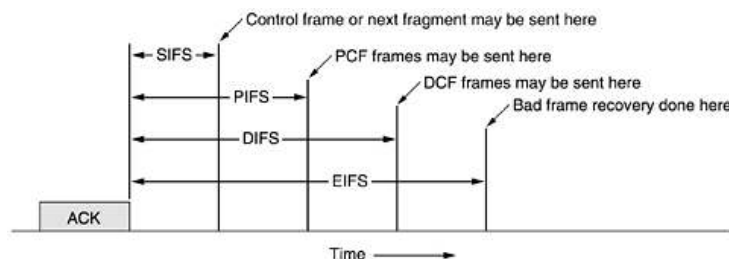
En este modo, la estación base sondea a las demás estaciones, preguntándoles si tienen tramas que enviar, por lo tanto controla el orden de las transmisiones y no hay colisión. El mecanismo básico consiste en que la estación base difunda una **trama de beacon** de manera periódica (10 a 100 veces por segundo). Esta trama contiene las secuencias de salto y permanencia, sincronización de reloj, etc. También invita a nuevas estaciones. A las estaciones que se inscriben se les garantiza de manera efectiva cierta fracción de ancho de banda.

La duración de la batería siempre es un problema en dispositivos móviles. En particular, una estación base puede conducir una estación móvil al estado de hibernación hasta que dicha estación base o el usuario lo saquen de él de manera explícita. Esto implica que la estación base tiene la responsabilidad de almacenar en el búfer las tramas que vayan dirigidas a ella mientras la estación móvil este hibernando.

PCF y DCF pueden coexistir dentro de una celda. Para ello se definió cuidadosamente cuatro intervalos de tramas.

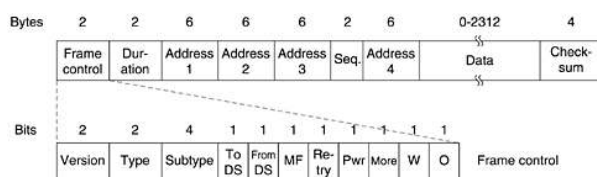
SIFS (Espaciado Corto Entre Tramas) se utiliza para permitir que las distintas partes de un diálogo transmitan primero. Incluye dejar que el receptor envíe una CTS (en respuesta a una RS), un ACK para un fragmento o una trama con todos los datos y dejar

que el emisor de una ráfaga transmita el siguiente fragmento sin tener que enviar una RTS nuevamente. Después de SIFS, una sola estación debe responder. Si falla y transcurre un tiempo **PIFS (Espaciado entre tramas PCF)**, la estación base podría enviar una trama de *beacon* o una trama de sondeo, que permite que la estación base envíe una trama de datos o una secuencia de fragmentos sin que nadie interfiera. Si la estación base no tiene nada que decir y transcurre un tiempo **DIFS (Espaciado Entre Tramas DCF)**, cualquier estación podría intentar adquirir el canal para enviar una nueva trama. Se aplican las reglas de contención normales, y si ocurre una colisión, podría necesitarse el retroceso exponencial binario. Solo una estación que recibió una trama errónea o desconocida utiliza el último intervalo **EIFS (Espaciado Entre Tramas Extendido)** para reportar la trama errónea.



4.4 La estructura de trama

Tres clases diferentes de tramas: de datos, de control y de administración dentro de la subcapa MAC.



Se definen los diferentes campos de la trama de datos.

- **Control de Trama**
 1. Versión de protocolo
 2. Tipo: datos, control o administración
 3. Subtipo: por ejemplo, RTS o CTS
 4. A DS: indica que la trama va hacia un sistema de distribución de celdas
 5. De DS: indica que viene
 6. MF: indica que siguen más fragmentos
 7. Retrans: indica una retransmisión
 8. Administración de energía: utilizado por la estación base para poner al receptor en estado de hibernación o recuperarlo
 9. Más: indica que el emisor tiene tramas adicionales para el receptor
 10. W: especifica que el cuerpo de la trama se codificó con **WEP (Privacidad Inalámbrica Equivalente)**
 11. O: Indica al receptor que el orden de las tramas es estricto
- **Duración:** tiempo que ocupa la trama y su confirmación en el canal
Este campo está presente también en el campo de control y es utilizado para el mecanismo NAV.
- **Dirección:** se utilizan 4 campos, 2 para origen y destino; y 2 mas para las estaciones base de origen y destino para el tráfico entre celdas
- **Secuencia:** para numeración de fragmentos. 12 bits identifican la trama y 4 el fragmento
- **Datos:** carga útil hasta 2312 bytes
- **Suma de verificación**

Las tramas de administración no tienen una de las direcciones, ya que se restringen a una sola celda. Las de control son más cortas; tienen una o dos direcciones, no tienen campo de *Datos* ni de *Secuencia*. La información clave está en *Subtipo* (RTS, CTS o ACK).

4.5 Servicios

Las LAN Inalámbrica 802.11 deben proveer 9 servicios. Cinco de distribución y cuatro de estación.

Los cinco servicios de distribución son proporcionados por las estaciones bases y tienen que ver con la movilidad de la estación:

1. **Asociación:** utilizado por las estaciones móviles para conectarse a la estación base. Una vez que la estación móvil está dentro del alcance de una estación base se identifica y comunica sus capacidades (tasas de datos y requerimientos de administración de energía). La estación base puede aceptar o rechazar la estación móvil.
2. **Disociación:** para romper la relación. Puede invocarlo la estación móvil o la base.
3. **Reasociación:** Si se utiliza correctamente, no se perderán datos como consecuencia del cambio de base (*handover*).
4. **Distribución:** Determina como enrutar tramas enviadas a la estación base (por aire o por red cableada).
5. **Integración:** Maneja la traducción de formato 802.11 a otro formato si fuese necesario.

Los cuatro servicios restantes son dentro de las celdas y luego de ocurrida la asociación:

1. **Autenticación:** Una estación debe autenticarse antes de que se le permita enviar datos. La estación base envía una trama de desafío. La estación móvil debe ser capaz de regresarla con la contraseña asignada para poder registrarse.
2. **Desautenticación:** Una estación previamente autenticada desea abandonar la red
3. **Privacidad:** Maneja la codificación y decodificación. El algoritmo es RC4 de Ronald Rivest (MIT)
4. **Entrega de Datos:** Es la parte esencial. Al igual que Ethernet no se garantiza la transmisión.

5 Banda Ancha Inalámbrica

Hay novedades en la “última milla”, debido a que el tendido de fibra óptica, cable coaxial o incluso cable de par trenzado categoría 5 a millones de casas y oficinas es extremadamente costoso, se creó la banda ancha inalámbrica. Las compañías de telecomunicaciones que no poseían cableado tienen mucho interés en proporcionar un servicio de comunicación inalámbrica de multimegabits.

El estándar se aprobó en abril de 2002, bajo el número **802.16** y se conoce como **MAN inalámbrico** o **circuito local inalámbrico**. Al igual que otro estándares 802, está influido fuertemente por el modelo OSI, incluyendo capas, subcapas, terminología, etc.

5.1 Comparación entre los estándares 802.11 y 802.16

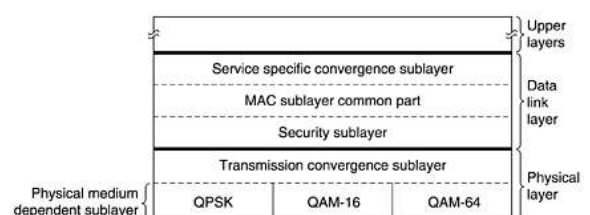
El porqué de no aplicar 802.11 para este tipo de comunicaciones, está dado porque el 802.16 resuelve otros problemas. Para empezar, en el 802.16 se brinda servicio a edificios, por lo que **las estaciones no migran de celda** con frecuencia. 802.11 tiene que ver con movilidad. 802.16 debe tener en cuenta que dentro de los edificios hay varias computadoras a las que brindar servicio. Debido a que los dueños de edificios por lo general están dispuestos a gastar más que los dueños de computadoras portátiles, hay **mejores radios**, y comunicación **dúplex total**.

El 802.16 está preparado para grandes distancias, aunque la energía detectada en la estación base puede variar considerablemente de estación a estación, lo que afecta la relación señal a ruido, por lo que existen **múltiples esquemas de modulación**. Además, la comunicación abierta a través de la ciudad significa que la **seguridad y privacidad son esenciales** y obligatorias.

Es probable que cada celda tenga muchos más usuarios que una celda 802.11 y se espera que éstos usuarios requieran **más ancho de banda**. Por esta razón es necesario más espectro que el de las bandas ISM, lo que obliga al estándar a funcionar en el **rango de frecuencia de 10 a 66 GHz**, el único lugar en el espectro disponible. Estas **ondas milimétricas** tienen propiedades físicas diferentes por lo que necesitan una capa física dedicada. El **control de errores es muy importante**, ya que las ondas son afectadas por lluvia, nieve, granizo y algunas veces niebla espesa. Las ondas milimétricas **pueden enfocarse** en contraste con el 802.11 que es omnidireccional. Por otro lado, la **calidad de servicio es importante**.

5.2 La pila de protocolos

Es similar a otras redes 802, pero con más subcapas. Arriba de la capa de transmisión física, están una **subcapa de convergencia** para ocultarle las diferentes tecnologías a la capa de enlace de datos. Aunque no están presentes se agregar dos nuevos protocolos a la capa física, el 802.16a que soporta OFDM en el rango de 2 a 11 GHz y el 802.16b operando en la banda ISM de 5 GHz.



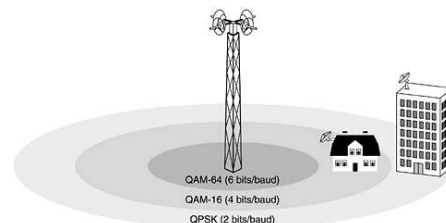
La **subcapa de seguridad** (en la capa de enlace de datos) maneja codificación, decodificación y administración de claves. Arriba de ella está la parte común de la subcapa MAC, donde se encuentran los principales protocolos como la administración de canal.

El modelo consiste en que la estación base controla el sistema. A diferencia de las demás redes 802, ésta es **completamente orientada a la conexión** para poder brindar comunicación telefónica y multimedia.

El estándar fue diseñado para integrarse sin ningún problema con protocolos de datagramas y con ATM, esta es orientada a la conexión por lo que no habría inconvenientes, pero **con los protocolos de paquetes** si, por lo que se encarga de esto la subcapa de **Convergencia específica del servicio**.

5.3 La capa física

Las microondas viajan en línea recta, en forma similar a la luz. Como consecuencia, la estación base puede tener múltiples antenas, cada una apuntando a un sector diferente. Cada sector tiene sus propios usuarios y es completamente independiente. La fuerza de señal desciende drásticamente con la distancia. La relación señal a ruido también. Por ello, el estándar emplea **3 esquemas de modulación dependiendo de la distancia**. Para suscriptores cercanos utiliza QAM-64 con 6 bits/baudio. A distancias medias QAM-16 con 4 bits/baudio. Para distantes QPSK con 2 bits/baudio. Para un valor típico de 25 MHz se obtiene: QAM-64 150 Mbps, QAM-16 100 Mbps y QPSK 50 Mbps.



Se utilizan dos esquemas para asignar ancho de banda. **FDD (Duplexación por División de Frecuencia)** y **TDD (Duplexación por División de Tiempo)**. Con TDD la estación base envía tramas periódicamente, cada trama contiene ranuras de tiempo. Las primeras son para tráfico descendente, luego está el tiempo de protección o guarda y finalmente las ranuras para el tráfico ascendente. El número de ranuras de tiempo dedicadas para cada dirección se puede cambiar de manera dinámica con el fin de que el ancho de banda coincida con el tráfico. La estación base asigna el tráfico descendente en ranuras de tiempo y controla por completo esta dirección. El ascendente depende de la calidad del servicio requerido.

Una característica interesante es la **posibilidad de empaquetar múltiples tramas MAC** consecutivas en una sola transmisión física. Otra es el uso de códigos Hamming para realizar **corrección de errores hacia adelante**.

5.4 El protocolo de la subcapa MAC

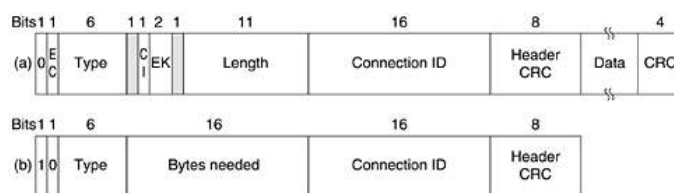
La subcapa de seguridad se encarga de codificar solo las cargas útiles, los encabezados no se codifican. En la parte común de la subcapa MAC, las tramas MAC ocupan un número integral de ranuras de tiempo de la capa física. Cada trama se compone de subtramas, las dos primeras son los mapas descendente y ascendente que indican lo que hay en cada ranura de tiempo y cuáles ranuras están libres. El canal descendente es directo, la estación base decide que se pone en cada subtrama. El canal ascendente es más complicado ya que hay suscriptores no coordinados compitiendo por él. Su asignación depende del tipo de servicio:

1. Servicio de tasa de bits constante
Diseñado para transmitir voz descomprimida. Se aloja mediante la dedicación de ciertas ranuras de tiempo a cada conexión de este tipo. Una vez que solicitado el ancho de banda, se asignan automáticamente ranuras disponibles.
2. Servicio de tasa de bits variable en tiempo real
Destinando a multimedia descomprimida y otras aplicaciones en tiempo real. El ancho de banda es ajustado por la estación base sondeando al suscriptor a un intervalo fijo para conocer la necesidad.
3. Servicio de tasa de bits variable no en tiempo real
Para transmisiones pesadas, como transferencia de archivos. La estación base sondea al suscriptor con mucha frecuencia.
4. Servicio de mejor esfuerzo
Utilizado para todo los demás. No se realiza sondeo y el suscriptor debe competir por ancho de banda. Los solicitudes se realizan en ranuras de tiempo que están marcadas, en el mapa ascendente, como disponibles para competencia. Se utiliza el algoritmo de retroceso exponencial binario.

Existen dos formas de asignación de ancho de banda: por estación y por conexión. En el primer caso, se le concede ancho de banda a la estación suscriptora que se encarga de asignarlo a sus usuarios como le considere necesario. En el otro caso la estación base administra cada conexión de manera directa.

5.5 La estructura de trama

Las tramas MAC comienzan con un encabezado genérico, a éste le sigue una carga útil y una suma de verificación (CRC) opcionales. La carga útil no es necesaria en tramas de control. La suma de verificación es opcional debido a la corrección de errores en la capa física y porque nunca se realiza un intento de retransmitir una trama.



El bit *EC* indica si la carga útil está encriptada. El campo *Tipo* identifica el tipo de la trama e indica si hay empaquetamiento y fragmentación. El campo *C* indica presencia de la suma de verificación. *EK* indica cuál clave de encriptación se está usando. *Longitud* proporciona la longitud exacta de la trama incluyendo la del encabezado. *Identificador de conexión* indica a cual conexión pertenece la trama. *CRC de encabezado* es la suma de verificación sólo del encabezado.

La figura (b) es una trama de solicitud de ancho de banda. El segundo y tercer byte forman un número de 16 bits que indica la cantidad de ancho de banda necesario para transmitir el número de bytes especificados.

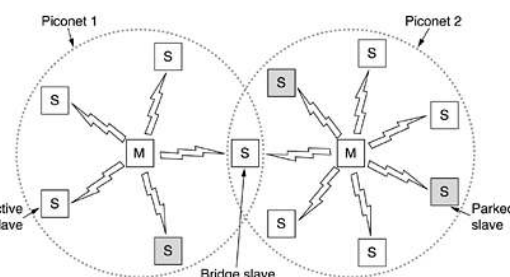
6 Bluetooth

En 1994 Ericsson junto con IBM, Intel, Nokia y Toshiba forman el SIG, un consorcio, para desarrollar Bluetooth. En 1999 se emitió la especificación V1.0. Poco después el IEEE lo adoptó como **802.15**. El comité 802.15 del IEEE estandarizó solamente las capas física y la de enlace de datos. El resto de la pila de protocolos está fuera de sus estatutos. El IEEE y el SIG tienen versiones diferentes, pero se espera que coincidan.

6.1 Arquitectura

La unidad básica de un sistema Bluetooth es una **piconet**, que consta de un nodo maestro y hasta siete nodos esclavos activos a una distancia de 10 metros. Las *piconets* se pueden conectar mediante un nodo puente. Un conjunto de *piconets* interconectadas se denomina **scaternet**.

Además de los 7 nodos activos, puede haber hasta 255 nodos estacionados en la red. Estos se encuentran en modo bajo consumo y sólo pueden responder a una señal de activación por parte del maestro. La razón para el diseño maestro/esclavo es que se pretendía implementar Bluetooth con chips por debajo de u\$s 5. Los esclavos son sumamente pasivos. Una *piconet* es un sistema TDM centralizado en el que el maestro controla el reloj y determina que dispositivo se comunica. Todas las comunicaciones son entre maestro y esclavo; no existe comunicación entre esclavos.



6.2 Aplicaciones de Bluetooth

La especificación Bluetooth V1.1 designa el soporte de 13 aplicaciones (**perfiles**) en particular y proporciona diferentes pilas de protocolos para cada una. Esto conlleva una gran complejidad.

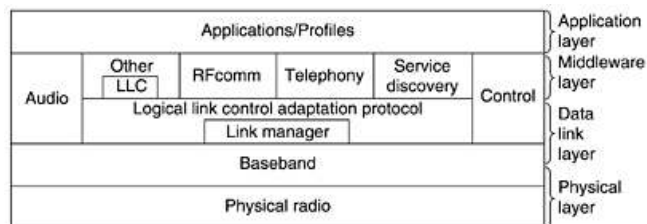
Acceso genérico no es una aplicación, sino la base; ofrece una manera de establecer y mantener enlaces (canales) seguros entre el maestro y los esclavos. El perfil de **Descubrimiento de servicios** también es genérico; los dispositivos lo utilizan para descubrir los servicios que ofrecen otros dispositivos. Todos los dispositivos Bluetooth deberían implementar estos perfiles. Los restantes son opcionales. **Puerto serie** es un protocolo de transporte. Emula una línea serie, especialmente útil para aplicaciones heredadas que lo requieren. El perfil de

Nombre	Descripción
Acceso genérico	Procedimientos para el manejo de enlaces
Descubrimiento de servicios	Protocolo para descubrir los servicios que se ofrecen
Puerto serie	Reemplazo para un cable de puerto serie
Intercambio genérico de objetos	Define la relación cliente-servidor para el traslado de objetos
Acceso a LAN	Protocolo entre una computadora móvil y una LAN fija
Acceso telefónico a redes	Permite que una computadora portátil realice una llamada por medio de un teléfono móvil
Fax	Permite que un fax móvil se comuniquen con un teléfono móvil
Telefonía inalámbrica	Conecta un headset (teléfono) con su estación base local
Intercom	Walkie-talkie digital
Headset	Posibilita la comunicación de voz sin utilizar las manos
Envío de objetos	Ofrece una manera de intercambiar objetos simples
Transferencia de archivos	Proporciona una característica para transferencia de archivos más general
Sincronización	Permite a un PDA sincronizarse con otra computadora

Intercambio genérico define una relación cliente-servidor para el traslado de datos. Los perfiles de **Acceso a LAN** (competencia directa del 802.11), **Acceso telefónico a redes** y **Fax** están orientados a la conectividad. Los 3 perfiles siguientes son para telefonía: el de **Telefonía inalámbrica** sirve para conectar un *handset* de un teléfono inalámbrico a la estación base. **Intercom** posibilita la intercomunicación de dos teléfonos móviles. **Headset** es el manos libres. Para intercambio de objetos (tarjetas de presentación, imágenes o archivos) entre dos dispositivos están los últimos tres perfiles.

6.3 La pila de protocolos

Bluetooth no sigue ningún modelo, aunque el IEEE lo está modificando para ajustarlo al 802. La capa inferior es la capa de **radio física**, similar a la capa física de OSI y 802. Se ocupa de la transmisión y modulación. La capa de **banda base** tiene algunos puntos en común con la subcapa MAC, aunque también incluye elementos de la capa física. Controla las ranuras de tiempo y el agrupamiento en tramas. La subcapa de **administrador de enlaces**



se encarga de establecer enlaces lógicos entre dispositivos, administración de energía, autenticación y calidad de servicio. El **protocolo de adaptación y control de enlaces lógicos** (también conocida como **L2CAP**) aísla a las capas superiores de los detalles de transmisión (similar a la subcapa LLC del 802), aunque los protocolos de **audio** y **control** pueden acceder directamente sin pasar por él. La capa *middleware* contiene una mezcla de protocolos: **LLC** para compatibilidad con redes 802, **RFComm** para emular el puerto serie, **Telefonía** es de tiempo real destinado a los tres perfiles orientados a voz, y **descubrimiento de servicios** para localizar los servicios dentro de la red. En la capa superior están los perfiles cada uno con sus protocolos.

6.4 La capa de radio

Traslada los bits del maestro al esclavo y viceversa. Posee un sistema de baja potencia (10 mts) con 79 canales de 1 MHz en la banda ISM de 2.4 GHz. Utiliza modulación por desplazamiento de frecuencia con 1 bit por Hz que rinde aproximadamente 1 Mbps. Para asignar canales, el espectro realiza 1600 saltos por segundo (tiempo de permanencia en frecuencia 625 µseg). Todos los nodos de una *piconet* saltan simultáneamente (el maestro establece la secuencia).

6.5 La capa de banda base

Es muy parecida a la subcapa MAC, convierte el flujo de bits puro en tramas y define algunos formatos claves. En la forma más sencilla el maestro define las ranuras de tiempo y las transmisiones las realiza en las ranuras pares, mientras que los esclavos lo hacen en las impares, es decir TDM. Las tramas pueden tener 1,3 o 5 ranuras de longitud. Debido a que el tiempo de asentamiento es de 250-260 µseg por salto, se desperdician 366 bits de los 625 de cada ranura, por ello es más eficiente utilizar 5 ranuras juntas, en las que se aprovechan 2781 bits de los 3125 (5 x 625). Cada trama se transmite por un canal lógico llamado **enlace**. Hay dos tipos de enlace **ACL** (Asíncrono no Orientado a la Conexión). Estos datos provienen de la capa L2CAP. Funciona sobre la base de mejor esfuerzo, no hay garantías. Las tramas perdidas se retransmiten. Un esclavo puede tener sólo un enlace ACL con su maestro. El otro tipo de enlace es el **SCO** (**Síncrono Orientado a la Conexión**) para datos en tiempo real. A este se le asigna una ranura fija en cada dirección. Las tramas no se retransmiten. Se puede utilizar corrección de errores hacia adelante. Un esclavo puede establecer hasta tres enlaces SCO con su maestro. Cada enlace puede transmitir un canal de audio PCM de 64 kbps.

6.6 La capa L2CAP

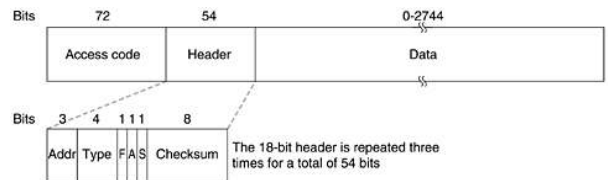
Tres funciones principales:

- Aceptar paquetes de hasta 64 KB y dividirlos en tramas
- Manejar la multiplexión y demultiplexión de múltiples fuentes de paquetes, reensambla los paquetes y determina que protocolo de la capa superior lo manejará
- Se encarga de la calidad de los requerimientos de servicio, al establecer el enlace y durante la operación. En el establecimiento del enlace negocia el tamaño máximo de carga útil (no todos los dispositivos soportan paquetes de 64 KB).

6.7 Estructura de la trama

Existen diversos formatos de trama. Se analiza el más importante. Este empieza con un código de acceso que identifica al maestro, a continuación el encabezado de 54 bits que contiene campos comunes de la subcapa MAC, luego el campo de datos (de hasta 2744 bits, para una transmisión de 5 ranuras).

Dirección identifica a cuál de los ocho dispositivos activos está destinada la trama. **Tipo** indica si la trama es ACL, SCO, de sondeo o nula; el tipo de corrección de errores y cuántas ranuras de longitud tiene la trama. El bit **F** índice que el búfer de un esclavo está lleno. El bit **A** indica ACK. El bit **S** sirve para numerar las tramas y detectar retransmisiones (protocolo de parada y espera). **Suma de verificación** es de 8 bits. El encabezado de 18 bis se repite tres veces (total 54 bits). En el receptor, un circuito sencillo examina las 3 copias, si son las mismas se acepta. Es necesaria una gran cantidad de redundancia para enviar datos de manera confiable en un entorno con ruido mediante dispositivos de bajo costo y baja potencia con poca capacidad de cómputo. En el campo **Datos** de las tramas ACL se utilizan varios formatos. Las tramas SCO son más sencillas siempre es de 240 bits. Se definen tres variantes de 80, 160 y 240 bits de carga útil real y el resto para corrección de errores. Con 80 bits el contenido se repite tres veces.

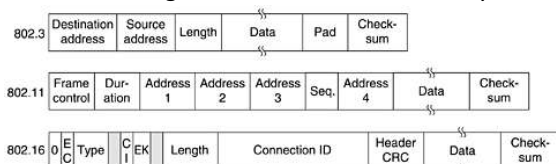
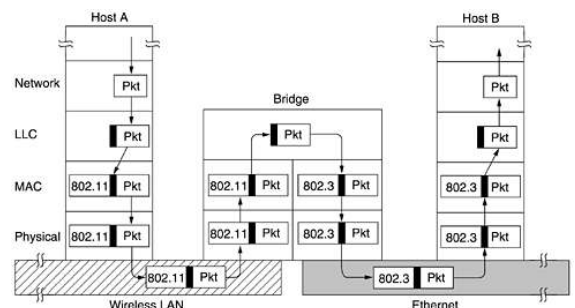


7 Conmutación en la capa de enlace de datos

Las LANs se pueden interconectar mediante **puentes**. Estos examinan las direcciones de la capa de enlace de datos para enrutar los datos, no examinan el campo de carga útil, por lo que pueden transportar paquetes IPv4, IPv6, AppleTalk, ATM, OSI y otros tipos. En contraste, los *enrutadores* examinan las direcciones de los paquetes y realizan su trabajo de enrutamiento con base en ellas.

7.1 Puentes de 802.x a 802.y

Ejemplo de operación entre un *host A* en una LAN inalámbrica (802.11) y un *host B* fijo, en una Ethernet (802.3). El paquete descende a la subcapa LLC y adquiere un encabezado LLC (en negro en la figura), pasa a la subcapa MAC y se le antepone un encabezado 802.11. Esta unidad viaja por el aire y es captada por la estación base. Cuando el paquete llega al puente entre la 802.11 y la 802.3, realiza el recorrido desde la capa física hacia arriba. Se quita el encabezado 802.11 de la subcapa MAC y se pasa el paquete a la LLC, está lo envía hacia abajo y se agrega el encabezado 802.3. Hasta acá parece fácil, pero no es así. En principio, cada LAN utiliza un formato de trama distinto, en consecuencia, cualquier copia que se realice entre LANs distintas requiere de volver a dar formato, lo que



lleva tiempo de procesamiento, una nueva suma de verificación y potenciales errores. En segundo lugar, las LANs interconectadas no necesariamente operan a la misma tasa de datos. Un tercer problema es que distintas LANs 802 tienen diferentes longitudes máximas de trama y en esta capa no es posible dividir la trama ni reensamblarlas, es decir, ningún protocolo confiere esta característica. Otro punto es la seguridad, 802.11 y 802.16 soportan encriptación en la capa de enlace, Ethernet no. Por lo tanto los servicios de encriptación en las redes inalámbricas se pierden cuando el tráfico pasa a Ethernet. Respecto a la calidad de servicio, 802.11 y 802.16 ofrecen diversas formas, pero en Ethernet no existe el concepto

de calidad de servicio, por lo tanto el tráfico proveniente de las dos anteriores perderá su calidad de servicio al pasar por Ethernet.

7.2 Interconectividad local

La interconexión entre LANs Ethernet se podría suponer que es automática que es solo cuestión de conectar las redes mediante puentes diseñados para el estándar IEEE y debería funcionar sin mayores inconvenientes ni grandes configuraciones. Esto es posible. En su forma más sencilla, un puente transparente funciona en modo promiscuo y acepta todas las tramas transmitidas son las LANs a las cuales está conectado. Cuando llega una trama, el puente decide si descartarla o reenviarla. En caso de reenviar, consulta la enorme tabla de *hash* que indica por cual salida (a una LAN) debe enviarse la trama. Al conectar los puentes por primera vez, sus tablas de *hash* están vacías. A medida que van llegando las tramas por medio de un algoritmo de inundación, envían la trama a todas las líneas. Con el paso del tiempo, los puentes aprenden donde están los destinos y van conformando su tabla *hash*. El algoritmo utilizado es **aprendizaje hacia atrás**. Cuando recibe una trama, examina su dirección de origen y guarda en su tabla el dato que esa máquina (la de origen) está en esa línea (por donde llegó la trama). La topología de las redes puede cambiar por lo que la tabla se mantiene dinámicamente, por lo tanto, cada vez que se realiza una entrada en la tabla de *hash* se registra en la entrada la hora de llegada de la trama. Un proceso del puente analiza periódicamente la tabla y purga todas las entradas tengan más de algunos minutos.

El procedimiento de enrutamiento entonces puede ser uno de los 3 casos:

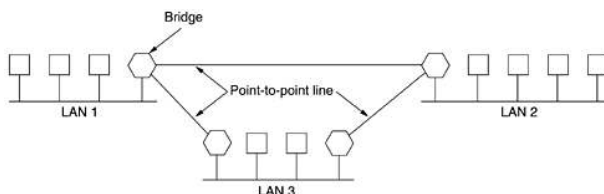
1. Si las LANs de destino y origen son la misma, la trama se descarta
2. Si las LANs de destino y origen son diferentes, la trama se reenvía
3. Si se desconoce la LAN de destino, recurrir a la inundación

7.3 Puentes con árbol de expansión

Para incrementar la confiabilidad, se pueden agregar dos o más puentes en paralelo. Sin embargo, esto genera algunos problemas adicionales. Por ejemplo, al llegar una trama con destino desconocido, se procede con inundación, cuando lo recibe otro puente (en paralelo), recurre igual a la inundación, y nuevamente pasa lo mismo, se entra en un *loop*. La solución es que los puentes se comuniquen entre sí y cubran la topología con un árbol de expansión que llegue a todas las LANs, de modo que exista exactamente una ruta desde cada LAN hasta las demás. Una vez que los puentes se ponen de acuerdo todos los envíos de hacen por medio del árbol de expansión. Para construirlos, primero hay que definir la raíz. Para eso los puentes difunden su número de serie, el puente con el menor número se vuelve raíz. Luego se construye un árbol con las rutas más cortas de la raíz a cada puente y LAN. Si falla un puente o una LAN, el árbol se recalcula.

7.4 Puentes remotos

Un uso común es conectar dos (o más) LANs distantes. Para ello se coloca un puente en cada LAN y se conectan los puentes mediante líneas punto a punto. A continuación tenemos un sistema normal de 6 LANs interconectadas mediante 4 puentes.

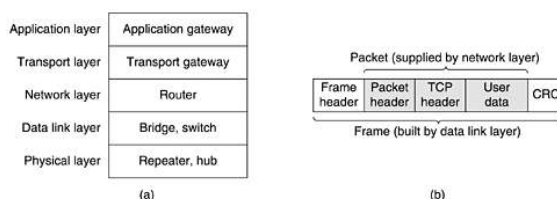


En las líneas punto a punto se pueden utilizar diversos protocolos. Una opción es elegir algún protocolo de enlace de datos estándar como PPP y colocar tramas MAC completas en el campo de carga útil. Otra opción es eliminar encabezado y terminador MAC en el puente de origen y agregar lo que queda en el campo útil del protocolo de punto a punto. Luego reconstruir en el puente destino, pero de ésta manera se pierde la suma de verificación.

7.5 Repetidores, concentradores, puentes, conmutadores, enrutadores y puertas de enlace

Todos estos dispositivos son de uso común, aunque difieren en formas sutiles y no tan sutiles.

Estos dispositivos operan en diferentes capas, es decir que utilizan diferentes partes de información para decidir su modo de operación.



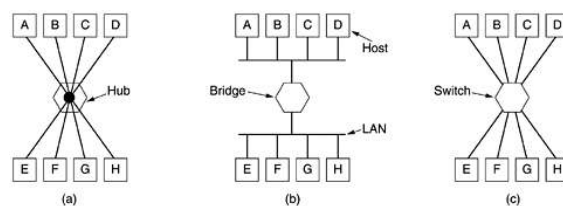
Los **repetidores** son dispositivos análogos conectados a dos segmentos de cable, una señal que aparece en uno de los extremos es amplificada y enviada al otro. Manejan voltios, no distinguen tramas, paquetes o encabezados.

Los **concentradores** tienen numerosos puertos de entrada que une de manera eléctrica. Las tramas que llegan se envían a todas las líneas. Si dos tramas llegan al mismo tiempo chocan, es decir, que constituye un solo dominio de colisión. Todas las líneas deben operar a la misma velocidad. No amplifican la señal. No examinan direcciones.

En la capa de enlace de datos operan los puentes y conmutadores. Un **puente** conecta dos o más LANs, cuando llega una trama, extrae la dirección de destino del encabezado y la busca en la tabla de *hash* para averiguar donde enviar la trama. Un puente puede tener tarjetas de línea (donde se conectan los *hosts*) para diferentes tipos de red y diferentes velocidades. Cada puerto constituye su propio dominio de colisión. Los **conmutadores** son similares a los puentes. La principal diferencia es que un conmutador se utiliza más comúnmente para la interconexión de computadoras individuales. Los conmutadores nunca pierden

tramas por colisiones (cada puerto constituye un único dominio de colisión), aunque podrían perderlas si se quedan sin espacio en el búfer. Para aliviar los búfers, los conmutadores modernos empiezan el reenvío tan pronto llega el encabezado de la trama, antes de que el resto de la trama llegue (**conmutadores cut-through**).

Los **enrutadores** eliminan encabeza y terminador de trama, y enrutan el paquete por software, que es quien elige el puerto de salida consultando el encabezado del paquete. El encabezado contiene una dirección de 32 bits (IPv4) o 128 bits (IPv6), no una dirección 802 de 48 bits.



Las **puertas de enlace de transporte** conectan dos computadoras que utilizan diferentes protocolos de transporte orientados a la conexión. Por ejemplo una computadora con protocolo TCP/IP con otra que emplea protocolo de transporte ATM.

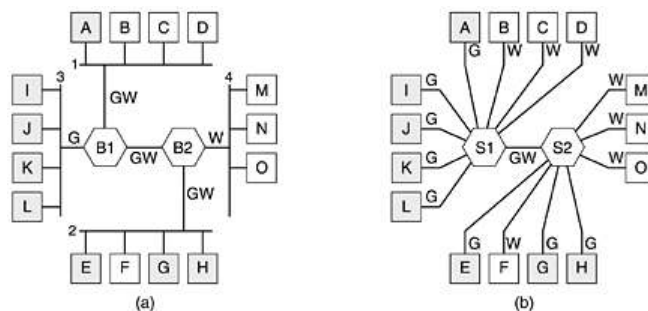
Las **puertas de enlace de aplicación** comprenden el formato y contenido de los datos y traducen los mensajes de un formato a otro.

7.6 LANs virtuales

En lugares donde los cambios son frecuentes, los administradores de red desperdician mucho tiempo quitando y metiendo conectores de un lado a otro. En respuesta a la demanda de mayor flexibilidad, se empezó a trabajar en una forma de volver a cablear edificios completos mediante software. El concepto que surgió se denomina **VLAN** (LAN Virtual) que fue estandarizado por el comité 802. Se fundamenta en conmutadores especialmente diseñados. Para configurar una red VLAN, el administrador de la red decide cuántas VLANs habrá, que computadoras compondrá cada una y como se llamarán. Es común nombrarlas mediante colores para que sea más fácil identificarlas al imprimir diagramas y reflejar en un solo esquema el diseño físico y lógico de toda la red.

En la figura (a), ocho maquinas pertenecen a la VLAN gris y siete a la VLAN blanca. La topología está formada por dos puentes (B1 y B2) que conectan cuatro LANs físicas.

En la figura (b) encontramos la misma configuración de VLAN pero con conmutadores y una sola máquina por puerto.



Para que las VLANs funcionen correctamente, las tablas de configuración se deben establecer en los puentes o en los conmutadores.

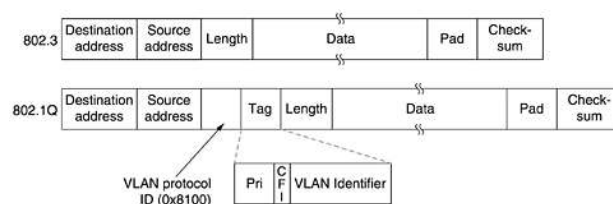
Los puentes y conmutadores direccionan en base a estos tres métodos:

1. **A cada puerto** se le asigna un color de VLAN
Solo funciona si todas las máquinas de un puerto pertenecen a la misma VLAN.
2. **A cada dirección MAC** se le asigna un color de VLAN
El puente o el conmutador tienen una tabla con las direcciones MAC de 48 bits de cada máquina conectada a ellos, junto con la VLAN a la que pertenece la máquina.
3. **A cada protocolo de la capa 3 o a cada dirección IP** se le asigna un color de VLAN
El puente o conmutador examina el campo de carga útil de la trama para, por ejemplo, clasificar todas las máquinas IP en una VLAN y todas las máquinas AppleTalk en otra. El problema de este enfoque es que transgrede la regla más elemental de la conectividad: independencia de las capas. Una consecuencia de esto es que un cambio en el protocolo de la capa 3 (por ejemplo, una actualización de IPv4 a IPv6) ocasiona que los conmutadores fallen repentinamente.

El estándar IEEE 802.1Q

En 1998 el comité IEEE 802 cambió el encabezado de Ethernet, que contiene una etiqueta VLAN, mediante el estándar **802.1Q**. La clave para la solución de los problemas del cambio de encabezado consiste en comprender que los campos VLAN sólo son utilizados por los puentes y los conmutadoras, no por las máquinas de los usuarios. Por lo tanto son estos dispositivos los que deben ajustarse al nuevo estándar. Las tarjetas Ethernet antiguas se pueden seguir utilizando sin inconvenientes. El primer puente o conmutador con soporte VLAN en recibir una trama agregará los campos y el último que los reciba los quitará. Mientras todas las tarjetas Ethernet no se apeguen al estándar 802.1Q estaremos donde empezamos, pero se espera que todas las tarjetas Gigabit Ethernet lo incluya.

Durante el proceso de transición, muchas instalaciones tendrán máquinas heredadas sin soporte para VLAN y otras que si. Las tarjetas Ethernet con soporte VLAN generan directamente tramas etiquetadas y la conmutación se vale de estas etiquetas. Cuando una máquina heredada envíe una trama a un conmutador VLAN, este genera una trama etiquetada apoyándose en el conocimiento que tiene de la VLAN del emisor. De ahí en adelante, no importa que el emisor sea una máquina heredada. Si el receptor es una maquina heredada, el conmutador VLAN debe formatear la trama.



La trama 802.1Q agrega un par de campos de dos bytes. El primero es la *ID del protocolo de VLAN*, que siempre tiene el valor 0x8100. El segundo campo contiene 3 subcampos. El principal es *Identificador de VLAN* (12 bits), *Prioridad* (3bits) que no tiene una funcionalidad específica pero se aprovecho el cambio para agregarle este aspecto y el bit *CFI* (*Indicador de Formato Canónico*) que no se utiliza.

Los conmutadores VLAN utilizan una tabla para averiguar el enrutamiento de las tramas con etiqueta 802.1q. Estas tablas se autogeneran en los enrutadores.

Contenido

Capítulo 1	2
1 Introducción	2
1.1 Usos de las redes de computadoras.....	2
1.2 Aplicaciones Domésticas.....	2
1.3 Usuario móviles.....	2
1.4 Temáticas sociales	3
2 Hardware de Redes	3
3 Software de Redes	4
3.1 Jerarquía de Protocolos	4
3.2 Aspectos de diseño.....	5
3.3 Servicios orientados a la conexión y no orientados a la conexión	5
3.4 Primitivas de servicio.....	5
3.5 Relación de servicios a protocolos	6
4 Modelos de referencia	6
4.1 OSI (Interconexión de sistemas abiertos)	6
4.2 TCP/IP (Protocolo de control de transmisión/Protocolo de Internet)	7
4.3 Comparación entre OSI y TCP/IP	8
4.4 Crítica al modelo OSI y los protocolos	8
4.5 Crítica del modelo de referencia TCP/IP	8
5 Redes de ejemplo.....	9
5.1 Internet.....	9
5.2 Redes orientadas a la conexión X.25, Frame Relay y ATM.....	9
X.25.....	9
Frame Relay	9
Modo de transferencia asíncrona (ATM)	9
5.3 Ethernet.....	10
5.4 LAN's inalámbricas 802.11	11
6 Estandarización de redes.....	11
6.1 Quién es quién en el mundo de las telecomunicaciones	11
6.2 Quién es quién en los estándares internacionales	12
6.3 Quién es quién en el mundo de los estándares de Internet	12
7 Unidades Métricas	12
Capítulo 2	14
1 La base teórica de la comunicación de datos	14
1.1 El análisis de Fourier.....	14
1.2 Señales de ancho de banda limitado	14

1.3 La tasa de datos máxima de un canal	15
2 Medios de transmisión guiados	15
2.1 Medios magnéticos	15
2.2 Par trenzado.....	15
2.3 Cable Coaxial.....	16
2.4 Fibra óptica	16
Transmisión de la luz a través de fibra óptica	17
Cables de fibra.....	17
Redes de fibra óptica	18
Comparación de la fibra óptica y el alambre de cobre	18
3 Transmisión Inalámbrica	18
3.1 El espectro electromagnético	18
3.2 Radiotransmisión.....	19
3.3 Transmisión por microondas.....	20
Las políticas del espectro electromagnético	20
3.4 Ondas infrarrojas y milimétricas	20
3.5 Transmisión por ondas de luz	20
4 Satélites de comunicaciones.....	21
4.1 Satélites geoestacionarios	21
4.2 Satélites de Órbita Terrestre Media	22
4.3 Satélites de Órbita Terrestre Baja	22
Iridium	22
Globalstar.....	23
Teledesic	23
4.4 Satélites en comparación con fibra óptica.....	23
5 La red telefónica pública conmutada	23
5.1 Estructura del sistema telefónico.....	24
5.2 La política de los teléfonos	25
5.3 El circuito local: módems, ADSL e inalámbrico.....	25
Módems.....	25
Líneas digitales de suscriptor (xDSL).....	26
Circuitos locales inalámbricos	27
5.4 Troncales de multiplexión.....	27
Multiplexión por división de frecuencia (FDM)	27
Multiplexión por división de longitud de onda (WDM)	28
Multiplexión por división de tiempo (TDM)	28
SONET/SDH	29
5.5 Conmutación.....	30
Conmutación de circuitos	30
Conmutación de mensajes.....	30
Conmutación de paquetes.....	30

6 El sistema telefónico móvil.....	31
6.1 Primera generación: voz analógica.....	31
Sistema avanzado de telefonía móvil (AMPS)	31
Canales	31
Administración de llamadas.....	32
6.2 Teléfonos móviles de segunda generación: voz digital.....	32
D-AMPS El sistema avanzado de telefonía móvil digital	32
GSM – Sistema Global para comunicaciones móviles	33
CDMA Acceso múltiple por división de código.....	33
6.3 Teléfonos móviles de tercera generación: voz y datos digitales	33
7 Televisión por cable	34
7.1 Televisión por antena comunal	34
7.2 Internet a través de cable	34
7.3 Asignación de espectro.....	34
7.4 Módems de cable	35
7.5 ADSL vs Cable	35
Capítulo 3	36
1 Cuestiones de diseño de la capa de enlace de datos	36
1.1 Servicios proporcionados a la capa de red.....	36
1.2 Entramado	36
1.3 Control de errores	37
1.4 Control de flujo	37
2 Detección y corrección de errores	37
2.1 Códigos de corrección de errores.....	38
2.2 Códigos de detección de errores.....	38
3 Protocolos elementales de enlace de datos	39
3.1 Un protocolo símplex sin restricciones.....	39
3.2 Protocolo símplex de parada y espera.....	39
3.3 Protocolo símplex para un canal con ruido.....	40
4 Protocolos de ventana corrediza	40
4.1 Un protocolo de ventana corrediza de un bit	41
4.2 Protocolo que usa retroceso N.....	41
4.3 Protocolo que utiliza repetición selectiva	42
5 Verificación de los protocolos.....	42
6 Ejemplos de protocolos de enlace de datos	42
6.1 HDLC – Control de enlace de datos de alto nivel.....	43
Tramas de información	43
Tramas de supervisión	43
Tramas no numeradas	44
6.2 La capa de enlace de datos en Internet.....	44

PPP – Protocolo Punto a Punto	44
Capítulo 4	46
1 El problema de asignación del canal	46
1.1 Asignación estática de canal en LANs y MANs.....	46
1.2 Asignación dinámica de canales en LANs y MANs	46
2 Protocolos de acceso múltiple	47
2.1 ALOHA.....	47
2.2 Protocolos de acceso múltiple con detección de portadora	47
2.3 Protocolos libres de colisiones	48
2.4 Protocolos de contención limitada	49
2.5 Protocolos de acceso múltiple por división de longitud de onda	49
2.6 Protocolos de LANs inalámbricas.....	50
3 Ethernet.....	51
3.1 Cableado Ethernet	51
3.2 Codificación Manchester.....	52
3.3 El protocolo de subcapa MAC de Ethernet	52
3.4 Algoritmo de retroceso exponencial binario.....	53
3.5 Desempeño de Ethernet	53
3.6 Ethernet conmutada.....	53
3.7 Fast Ethernet	53
3.8 Gigabit Ethernet	54
3.9 Estándar IEEE 802.2: control lógico de enlace.....	55
3.10 Retrospectiva de Ethernet.....	56
4 LANs Inalámbricas	56
4.1 La pila de protocolos.....	56
4.2 La capa física.....	56
4.3 El protocolo de la subcapa MAC.....	57
4.4 La estructura de trama.....	58
4.5 Servicios	58
5 Banda Ancha Inalámbrica	59
5.1 Comparación entre los estándares 802.11 y 802.16.....	59
5.2 La pila de protocolos.....	59
5.3 La capa física.....	60
5.4 El protocolo de la subcapa MAC.....	60
5.5 La estructura de trama.....	61
6 Bluetooth.....	61
6.1 Arquitectura	61
6.2 Aplicaciones de Bluetooth.....	61
6.3 La pila de protocolos.....	62
6.4 La capa de radio.....	62
6.5 La capa de banda base	62
6.6 La capa L2CAP.....	62

6.7 Estructura de la trama	62
7 Conmutación en la capa de enlace de datos.....	63
7.1 Puentes de 802.x a 802.y	63
7.2 Interconectividad local.....	63
7.3 Puentes con árbol de expansión.....	64
7.4 Puentes remotos	64
7.5 Repetidores, concentradores, puentes, conmutadores, enrutadores y puertas de enlace	64
7.6 LANs virtuales.....	65