
WAN

Redes de gran alcance

PID_00268539

Enric López i Rocafiguera
Pere Barberán Agut

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 9 horas



**Pere Barberán**

Ingeniero de Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor de la Escuela Universitaria Politécnica de Mataró donde forma parte del Área de Redes y Servicios. De 2005 a 2010 ha sido director del Departamento de Telecomunicaciones y Arquitectura de Computadores. Actualmente responsable del laboratorio de *networking* TCM NetLab en la Fundación Tecnocampus Mataró-Maresme.

**Enric López Rocafiguera**

Ingeniero de Telecomunicaciones, en la especialidad de Comunicaciones por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona, de la Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor de Redes de comunicaciones y Redes de computadores, en las carreras de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, Ingeniería Técnica Industrial e Ingeniería Técnica Informática en la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Vic (UVic). Miembro del grupo de la UVic. Profesor del máster de Tecnologías de la información y la comunicación en la empresa. Ha sido jefe del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, y miembro del Consejo de Dirección del EPS de la UVic.

La revisión de este recurso de aprendizaje UOC ha sido coordinada por el profesor: Ferran Adelantado Freixer (2019)

Segunda edición: septiembre 2019

© Enric López i Rocafiguera, Pere Barberán Agut

Todos los derechos reservados

© de esta edición, FUOC, 2019

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Realización editorial: FUOC

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
1. Redes de conmutación	7
1.1. Conmutación de circuitos	9
1.2. Conmutación de paquetes	11
1.2.1. Introducción a la transmisión de datos	11
1.2.2. Conmutación de mensajes	11
1.2.3. Conmutación de paquetes	13
1.2.4. Conmutación de celdas	21
1.3. Encaminamiento	22
1.3.1. Encaminamiento no adaptativo	23
1.3.2. Encaminamiento adaptativo	25
1.4. Control de tráfico	26
1.4.1. Control de flujo	26
1.4.2. Control de congestión	27
1.4.3. Prevención de la congestión	28
2. Red telefónica conmutada (RTC)	30
2.1. Estructura y servicios de la red telefónica	30
2.2. Planificación de la red telefónica	31
2.2.1. Tráfico	31
2.2.2. Modelos	33
2.3. Sistema de transmisión	33
2.3.1. Multiplexación analógica (FDM)	34
2.3.2. Multiplexación digital (TDM)	35
2.3.3. Jerarquía digital plesiócrona (PDH)	35
2.4. Evolución de la red telefónica	36
2.5. xDSL	37
2.5.1. Tecnología DSL	37
2.5.2. ADSL	38
2.5.3. Familias xDSL	42
2.5.4. Factores que afectan al rendimiento de la DSL	43
3. Frame relay	44
3.1. Evolución de la X.25	44
3.1.1. Principales características de la X.25	44
3.1.2. Comparación entre X.25 y <i>frame relay</i>	45
3.2. Protocolos del <i>frame relay</i>	46
3.2.1. Protocolo LAPF	47
3.2.2. Núcleo del LAPF	47

3.2.3. Identificador de conexión del enlace de datos (DLCI)	48
3.2.4. Protocolo LAPF en el plano de control	49
3.2.5. Control de flujo	49
3.2.6. Congestión	49
3.2.7. Gestión del tráfico.....	50
3.2.8. Control de congestión	53
4. Modo de transferencia asíncrona (ATM)	54
4.1. Configuración y modelo de referencia de la ATM	55
4.2. Nivel físico. Estructura SDH	56
4.2.1. Estructura de protocolos	57
4.2.2. Estructuras de transmisión. Jerarquía digital síncrona	57
4.2.3. Estructura de la trama SDH	58
4.3. Nivel ATM. Celdas	61
4.3.1. Formato de la celda	61
4.3.2. Multiplexación ATM	63
4.4. Nivel de adaptación ATM (AAL)	64
4.4.1. Estructura del nivel AAL	65
4.4.2. Servicios del nivel AAL	70
4.5. Gestión del tráfico	71
4.5.1. Definición de parámetros de contrato de tráfico	71
4.5.2. Control de congestión	72
4.5.3. Control de congestión preventivo	73
4.5.4. Control de congestión reactivo	75
5. Multiprotocol label switching	77
5.1. Problemas experimentados por los proveedores de servicio	77
5.2. ¿Qué es MPLS?	78
5.3. Beneficios de MPLS	78
5.4. Características de MPLS	78
5.5. Pila de etiquetas MPLS (MPLS label stack)	79
5.5.1. Cabecera insertada (<i>shim header</i>)	80
5.5.2. <i>Forwarding equivalence class</i> (FEC)	80
5.6. Arquitectura MPLS	80
5.7. Componentes de red MPLS	81
5.7.1. Establecimiento del LSP	82
5.8. Protocolo de distribución de etiquetas (LDP)	83
5.9. Ejemplo de topología MPLS	85
Anexo	90
Resumen	101
Actividades	103
Ejercicios de autoevaluación	103

Solucionario	106
Glosario	108
Bibliografía	112

Introducción

Un hecho importante en estas últimas décadas ha sido la interconexión entre las personas y los ordenadores para poder comunicarse a distancia. Mientras que las redes de área local (LAN) proporcionan la capacidad para transmitir datos a un pequeño grupo de usuarios cerrado en un área limitada, como puede ser una oficina, un edificio, un campus; las **redes de gran alcance** (WAN) poseen la capacidad de cubrir geográficamente todo el planeta, más allá del alcance que pueden controlar sus usuarios, y de contar con un número muy grande de usuarios. El principal ejemplo es Internet.

Los siguientes son los principales requisitos que deben tener las redes WAN con el fin de transmitir la información:

- Los datos han de llegar a su destino libres de errores.
- Los datos deben llegar lo antes posible después de su transmisión. La entrega ha de ser casi instantánea.
- El destino debe poder extraer la información de los paquetes que reciba.

Estos requisitos nos llevan a formularnos una serie de preguntas que responderemos en este módulo didáctico y que se hallan relacionadas con un conjunto de conceptos como los siguientes:

- Para que la información llegue a su destino, el servicio que utilizaremos podrá ser orientado a conexión, o no. Será necesario que los paquetes de información lleven asociado un campo de dirección para indicar el destino de la información en la cabecera. Esta dirección ha de servir para que los nodos encaminen correctamente los datos por medio de sus conmutadores.
- Para que la transmisión sea rápida serán necesarios sistemas con pequeños retardos. Estos retardos dependen de diferentes factores, como el tiempo de propagación, la cantidad de mensajes que son necesarios para llevar a cabo la comunicación, el tiempo de procesamiento en los nodos y, finalmente, la calidad del medio de transmisión.
- Para que el destino pueda extraer la información de los paquetes que le llegan los protocolos deben permitirlo.

En este módulo didáctico veremos los principios de funcionamiento y las características más importantes de estos tipos de redes y analizaremos algunos de los aspectos que acabamos de mencionar y que son clave en su diseño. Presentaremos asimismo algunos ejemplos de redes de gran alcance que podemos encontrar actualmente, como la red telefónica conmutada, el *frame relay* o ATM y su evolución con la red MPLS.

Objetivos

Estos materiales didácticos deben permitir que alcancéis los siguientes objetivos:

1. Asumir el funcionamiento de las diferentes redes de conmutación, en particular las de conmutación de circuitos y de paquetes.
2. Poder comprender las conmutaciones en modo datagrama y en modo circuito virtual y poder compararlas.
3. Estudiar la red telefónica conmutada (RTC), su arquitectura y estructura de los datos. Entender su evolución hasta las tecnologías de alta velocidad actuales.
4. Estudiar la tecnología *frame relay* y compararla con su predecesora X.25.
5. Comprender la necesidad de la gestión del tráfico y del control de congestión en la red *frame relay*.
6. Asimilar el modo de transferencia asíncrono (ATM) y conocer las diferencias que presenta respecto a *frame relay*.
7. Conocer los protocolos asociados a cada nivel de la tecnología ATM y las jerarquías de multiplexación síncrona (SDH).
8. Conocer las características básicas del protocolo MPLS, su justificación, características y funcionamiento básico.

1. Redes de conmutación

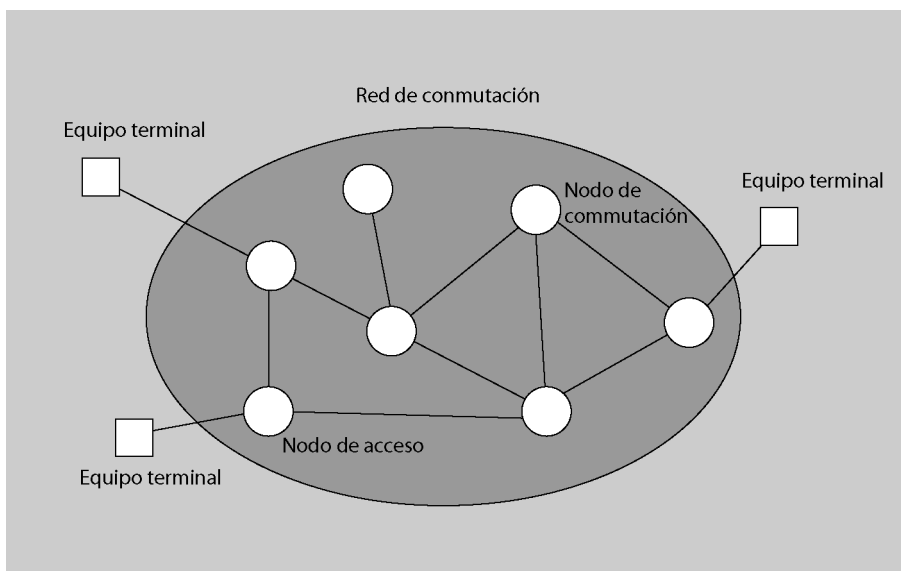
Podemos dividir una red de conmutación en los medios de transmisión y de conmutación, que son los que permiten establecer caminos físicos o virtuales entre el origen y el destino. El medio de transmisión puede ser el cable bifilar o coaxial, la guía de onda, la fibra óptica y los satélites. Los medios de conmutación son los que permiten a un abonado, o terminal, poder elegir el abonado con el que se quiere comunicar.

Las redes de gran alcance (WAN) son redes conmutadas.

Una red está formada por tres elementos: !

- **Enlaces.** Son los medios de comunicación que permiten establecer uno o más canales de comunicación entre dos puntos de una red. Habitualmente están multiplexados para permitir más de una comunicación simultánea mediante cada uno de ellos y aumentar así el número de conexiones posibles mediante la red.
- **Nodos.** Son los puntos de la red donde llegan dos o más enlaces y se realizan las funciones de conmutación. La misión principal de los nodos es encaminar los datos de manera que puedan llegar desde el equipo de origen hasta el de destino. Existen dos tipos de nodos: los que sólo se hallan conectados a otros nodos, denominados **nodos de conmutación**, y los que, además, se conectan a los terminales, denominados **nodos de acceso**, que permiten el acceso a la red.
- **Equipos terminales.** Son los elementos electrónicos que nos permiten poner o extraer señales en la red mediante un enlace.

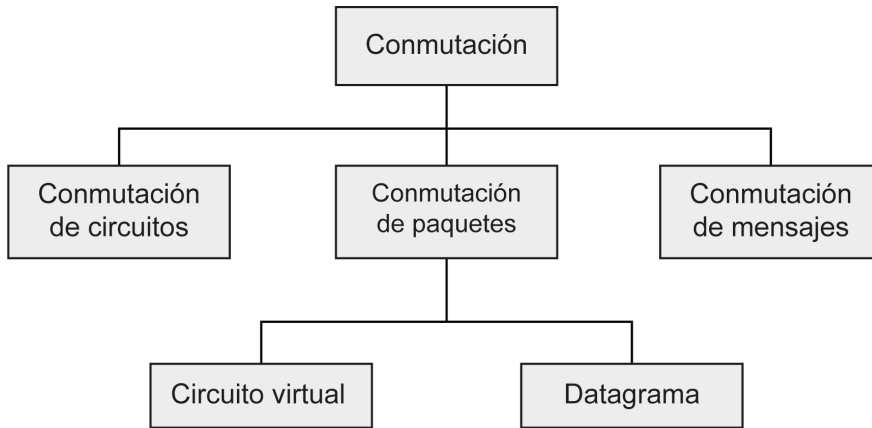
Figura 1. Esquema de una red de conmutación



Desde el punto de vista de los equipos que se interconectan, el recurso que comparten no es un solo cable o un anillo, sino que es toda la red.

Se dan diferentes técnicas de conmutación: !

Figura 2. Esquema de redes de conmutación



- **Conmutación de circuitos.** Consiste en establecer un circuito físico previamente al envío de información que se mantiene abierto mientras dura la transmisión. Puede ser espacial y asignar un circuito físico separado de los otros, o temporal, que se comparte con otros usuarios.
- **Conmutación de mensajes.** Está basado en el tratamiento de bloques de información con un mismo origen y destino, y son tratados en los centros de conmutación. Los retardos son elevados. Son ejemplos la red Télex y la SITA de reserva de vuelos.
- **Conmutación de paquetes.** Similar a la de mensajes, sin embargo utiliza **paquetes** cortos y de longitud fija. Cada uno de ellos posee la información necesaria para llegar al destino. Es muy rápida y existen dos tipos de la misma:
 - **Datagrama:** cuando la señalización no influye sobre el canal de comunicaciones previamente a la transmisión, no cabe establecer el camino previo y se elige según el estado de la red. Los paquetes pueden llegar en desorden.
 - **Circuito virtual:** se establece un camino lógico previamente al envío de los paquetes con el intercambio de señales entre el origen y el destino. Así aseguramos que lleguen a su destino y ordenados. Lo utiliza la red de conmutación de paquetes X.25.


También existen las líneas dedicadas, que son redes en las que no se encuentra la parte de conmutación, es decir, que no pueden elegir el equipo terminal al que se quieren conectar y siempre deben comunicarse con los mismos abonados.

1.1. Conmutación de circuitos

La conmutación de circuitos es el modo de operación de una red en el que la comunicación entre dos terminales se produce mediante caminos establecidos al inicio de la comunicación, no varían durante la comunicación en sí y se dedican en exclusiva a esta comunicación.

En la conmutación de circuitos los caminos se crean al inicio de la comunicación, por conmutación en los nodos intermedios, uniendo una serie de circuitos físicos (por ejemplo, una línea de par trenzado dentro de un cable de pares, un canal en un sistema FDM o TDM, en un canal de radiofrecuencia o en una fibra óptica). Las características más relevantes de las comunicaciones que utilizan la conmutación de circuitos son las siguientes:

- La anchura de banda, o velocidad de transmisión, es fija.
- El retardo es pequeño y constante.

Este camino está formado por diferentes enlaces entre los nodos, y es necesario crearlo previamente al inicio de la transmisión de los datos y liberarlo al acabar la transmisión. Así, en todas las conexiones mediante la técnica de conmutación de circuitos, podemos distinguir tres fases: 

1) **Establecimiento del circuito.** Lo primero que se debe hacer es encontrar un camino mediante la red entre los dos equipos que se quieren comunicar. El equipo de origen lo pide al nodo al que está conectado. Este nodo es el encargado de trasladar la petición a uno de los nodos intermedios a los que está conectado; éste, a otro, y así sucesivamente hasta llegar al equipo de destino. A medida que la petición va pasando por los nodos, se va creando el circuito. La forma en la que se va creando el camino sigue unos criterios de encaminamiento, de coste, etc. Si el equipo de destino acepta la conexión, envía una señal al equipo de origen para indicárselo.

2) **Transferencia de datos.** Entre los equipos se establece un circuito, igual que si estuvieran conectados directamente, y la información se transmite sobre este circuito. Los recursos que forman el circuito están ocupados, aunque no se dé transferencia de datos, hasta que no se solicite explícitamente el final de la conexión. Ello puede provocar un uso ineficiente de la red si el porcentaje del tiempo total de conexión durante el que realmente se transfiere información es bajo.

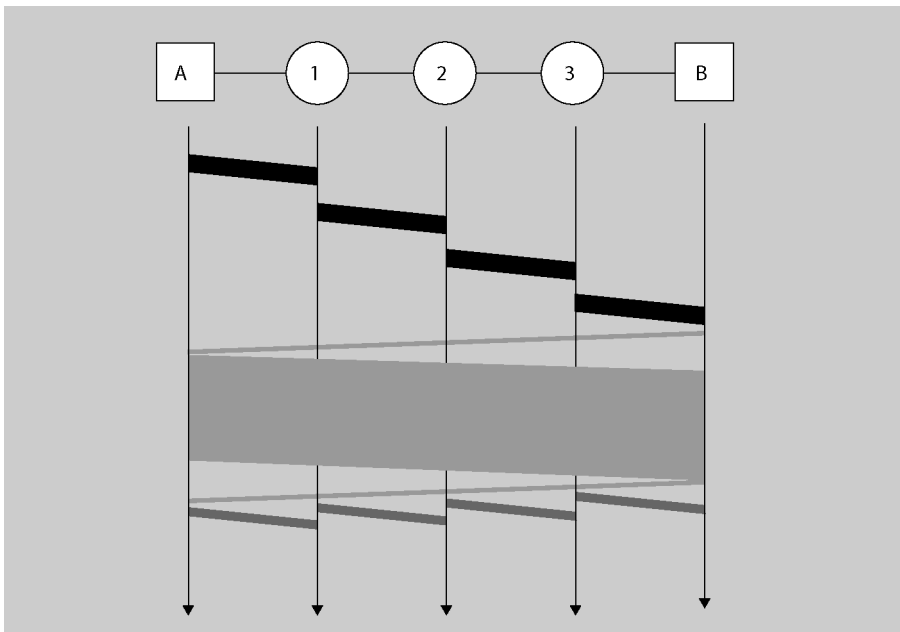
3) **Desconexión.** Acabada la transferencia, cabe liberar los recursos que se han utilizado para que puedan ser utilizados posteriormente. El origen, o el destino, indican a su nodo más próximo que se ha acabado la conexión y liberan los recursos. Esto lo realizan los diferentes nodos por donde pasa la conexión hasta liberar todo el camino.

Diagrama temporal de una conexión con conmutación de circuitos

El diagrama temporal nos muestra una conexión de dos equipos por medio de tres nodos, mediante conmutación de circuitos. En el eje horizontal hemos representado la conexión, con los nodos correspondientes indicados con líneas verticales, mientras que en el vertical se encuentra el tiempo. Las líneas inclinadas simbolizan el camino de los datos desde un punto hasta otro. La inclinación indica la velocidad de la transmisión: cuanto más inclinada es la línea, menor es la velocidad de transmisión.

- Inicialmente, el equipo de origen (A) envía una señal de petición de establecimiento de circuito que va atravesando los nodos hasta llegar al equipo de destino (B).
- El equipo de destino (B) acepta la conexión y envía una señal de aceptación al equipo de origen por el camino ya creado (en este caso no se da retardo de procesamiento en los nodos).
- Después de haber recibido la señal de aceptación, se inicia el intercambio de datos.
- Finalmente, el equipo de destino envía una señal de fin de conexión atravesando los diferentes nodos, que sirve a los nodos para liberar los enlaces ocupados y responder a la señal de fin de conexión.

Figura 3. Diagrama temporal de una conexión con conmutación de circuitos



En este tipo de conmutación los nodos no realizan ninguna función de almacenaje, sino que efectúan funciones estrictamente de conmutación. Como la reserva de recursos de la red se lleva a cabo en exclusiva, la conmutación de circuitos resultará efectiva cuando estas características se aprovechen al máximo, por lo tanto, para flujos continuos de datos. El ejemplo más claro e importante de esta manera de trabajar es la transmisión de voz por la red telefónica con los estándares del ITU-T (con sus circuitos digitales *full-duplex* a 64 kbit/s dedicados a cada llamada).

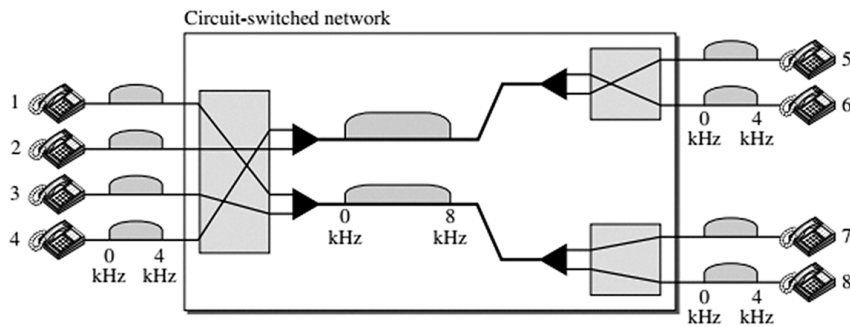
Recordad que en conmutación de circuitos hay que reservar los recursos durante la fase de establecimiento; estos recursos son dedicados durante toda la fase de transferencia de datos hasta la fase de desconexión.

Ejemplo

Disponemos de una red de conmutación de circuitos para conectar ocho teléfonos. La comunicación se hace por medio de canales de voz a 4 kHz. Los enlaces son FDM y permiten un máximo de dos canales de voz. Así, el ancho de banda es de 8 kHz. En la figura se muestra la red del ejemplo. El teléfono 1 se conecta con el teléfono 7; el 2 con el 5; el

3 con el 8, y el 4 con el 6. Así, los conmutadores hacen el multiplexado y demultiplexado de los canales. En esta topología, si un nuevo teléfono se quisiera conectar, no podría hasta que alguna de las conexiones existentes liberara los recursos.

Figura 4. Red de conmutación de circuitos del ejemplo



1.2. Conmutación de paquetes

1.2.1. Introducción a la transmisión de datos

A causa de la necesidad de la transmisión de datos entre equipos informáticos, inicialmente se utilizó la red telefónica. Este sistema es muy ineficaz, ya que la RTC mantiene las líneas ocupadas aunque no haya información circulante en ellas y los equipos informáticos generen un flujo de datos a ráfagas, con lo cual el tanto por ciento de tiempo en el que se utiliza la línea suele ser bastante bajo. Además, la conmutación de circuitos necesita que los dos sistemas conectados trabajen a la misma velocidad, hecho que no suele darse en sistemas de transmisión de datos.

Las técnicas de conmutación de paquetes aparecieron como una alternativa a la conmutación de circuitos para la transmisión de datos con el objetivo de solucionar sus carencias:

- Permitir la interconexión entre equipos de diferentes velocidades de transmisión.
- Mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos de la red.
- Permitir poner prioridades en los paquetes.
- Poder establecer diferentes conexiones simultáneas de manera flexible.

1.2.2. Conmutación de mensajes

Cuando un terminal quiere enviar un mensaje a otro, este terminal añade la dirección de destino y transmite el mensaje hacia la red para que viaje nodo a nodo hasta llegar al destino. En cada nodo intermedio el mensaje es almacenado temporalmente y después, a partir de la información de encaminamiento y la disponibilidad del nodo, se determina el nodo siguiente de la conexión y se deja en la cola correspondiente al enlace de salida. Posteriormente, cuan-

do sea su turno, el mensaje será enviado. Este proceso continúa hasta que el mensaje llega a su destino.

Esta técnica presenta ciertas ventajas sobre la técnica de conmutación de circuitos. Primero, la eficiencia de los canales de conmutación es mayor, ya que los canales entre los nodos no se dedican exclusivamente a la comunicación entre dos terminales, sino que son compartidos por muchos mensajes. Además, no requiere que el transmisor y el receptor estén disponibles simultáneamente. Por otra parte, cuando el tráfico aumenta en las redes de conmutación de circuitos, algunas solicitudes quedan bloqueadas, pero en redes de conmutación de mensajes sólo provocan un aumento del tiempo que tarda en llegar el mensaje a su destino.

Otras características de la conmutación de mensajes son las siguientes: un mensaje puede ser enviado a muchos destinos, se puede establecer prioridad en los mensajes, el control y la recuperación de errores pueden ser efectuados en la red de comunicación, incluso se pueden realizar cambios de velocidad de transmisión y de códigos.

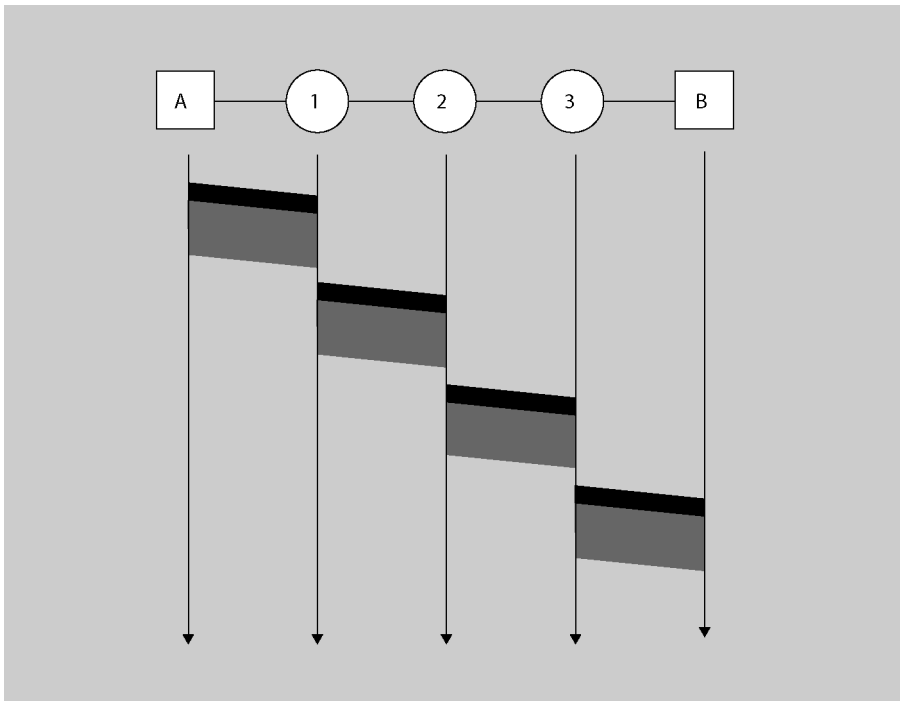
El principal inconveniente de la conmutación de mensajes es que cada nodo que interviene en una conexión debe esperar hasta haber recibido todo el mensaje para poder decidir hacia dónde ha de transmitirlo, y, por lo tanto, no es útil para procesos en tiempo real, ya que el tiempo para que llegue el mensaje a su destino puede ser grande. Precisamente por este motivo esta técnica no se utiliza mucho. Como ejemplo podemos mencionar la red telegráfica.

Diagrama temporal de una conexión con conmutación de mensajes

En una conexión con conmutación de mensajes el procedimiento para la transmisión de la información es el siguiente:

- Suponemos que A, sin esperar a que se haya establecido el camino, envía un mensaje entero al nodo 1. Éste lo almacena y a continuación lo transmite al nodo 2.
- Una vez A ha enviado el mensaje al nodo 1, ya se puede liberar el enlace para volver a utilizarlo cuando A tenga otro mensaje a punto para transmitir. Lo mismo se puede decir para los otros enlaces entre los diferentes nodos, hasta que el último nodo envía el mensaje a su destino.

Figura 5. Diagrama temporal de una conexión con conmutación de mensajes



Cabe remarcar que los enlaces sólo están ocupados el tiempo que realmente se utilizan y, por lo tanto, la eficiencia es superior. Además, no es necesario que estén disponibles todos los nodos; mientras la estación A transmite el mensaje al nodo 1, el resto de enlaces pueden estar ocupados por otras conexiones.

1.2.3. Conmutación de paquetes

Con el fin de evitar los inconvenientes de la conmutación de mensajes, cuando un equipo necesita enviar un mensaje de longitud mayor al tamaño fijado para un paquete, se dividen los mensajes en trozos de longitud pequeña (por ejemplo, 1 kbyte) denominados **paquetes**, y en cada paquete se añade una información de control que incluye los datos que son necesarios en la red para poder encaminarlo adecuadamente y para detectar los posibles errores. De esta manera, se reduce la memoria necesaria para el almacenaje y el tiempo de procesamiento dentro de los nodos, con la reducción consecuente de retardo acumulado dentro de la red.

Los paquetes son unidades de información formadas por grupos de bits.

En las redes de conmutación de paquetes, no hay una reserva de recursos; los recursos se distribuyen bajo demanda.

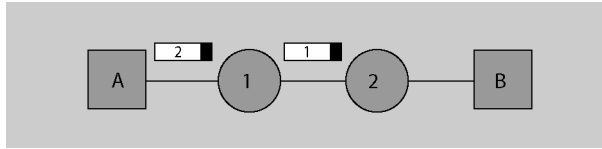
Ejemplo de conmutación de paquetes

Algunos ejemplos de este tipo de conmutación se encuentran en las redes de datos públicas o privadas que operan con estándares, como X.25, *frame relay*, TCP/IP, etc.

Si tenemos conectados dos terminales por dos nodos intermedios mediante conmutación de paquetes, el procedimiento que se sigue para la transmisión de la información del nodo A al nodo B es semejante a la conmutación de mensajes:

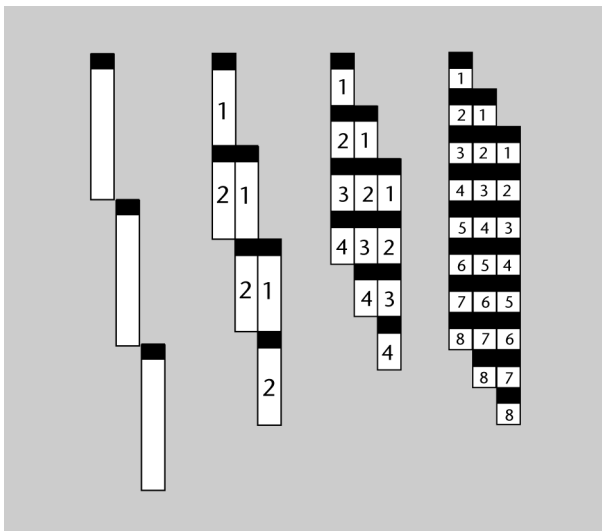
- Suponemos que A envía un paquete al nodo 1. Éste lo almacena y a continuación lo transmite al nodo 2.
- Una vez A ha enviado el primer paquete al nodo 1, ya se puede liberar el enlace o utilizarlo para transmitir el paquete siguiente. El proceso se puede realizar hasta acabar de transmitir todos los paquetes. Lo mismo ocurre en los otros enlaces entre los diferentes nodos, hasta que el último nodo envía el último paquete al destino.

Figura 6. Conexión de dos terminales mediante dos nodos intermedios



Supongamos, por ejemplo, que queremos transmitir un mensaje de 24 *bytes* desde un terminal a otro pasando por los dos nodos, 1 y 2. Supongamos también que cada paquete tiene una cabecera de 3 *bytes*. Podemos enviar un único paquete de 27 *bytes*, o bien dividir el mensaje en dos, cuatro u ocho partes. En la figura 7 tenemos representado el tiempo de transmisión para los cuatro casos indicados anteriormente. A medida que disminuimos la longitud del paquete disminuimos el tiempo de transmisión, hasta el punto de que si troceamos tanto el mensaje, se dan tantas cabeceras que hacen aumentar el tiempo de transmisión otra vez.

Figura 7. Tiempo de transmisión en función de la longitud del paquete



Las principales ventajas de la conmutación de paquetes respecto a la conmutación de circuitos son las siguientes:

- La anchura de banda no está prefijada, es decir, la red proporciona capacidad según la demanda y en función de la disponibilidad de los recursos.
- La eficiencia de la línea es mayor, ya que cada enlace se comparte entre varios paquetes que estarán en la cola para ser enviados cuando se pueda.
- Se permiten conexiones entre equipos de velocidades diferentes: ello es posible ya que los paquetes se van guardando en cada nodo conforme llegan y se van enviando a su destino.
- No se bloquean llamadas, pues todas las conexiones se aceptan, aunque si se dan muchas llamadas se producen retardos en la transmisión.

- Se pueden poner prioridades: un nodo puede seleccionar de su cola de paquetes que han de ser transmitidos los que tienen la prioridad más elevada según ciertos criterios de prioridad.

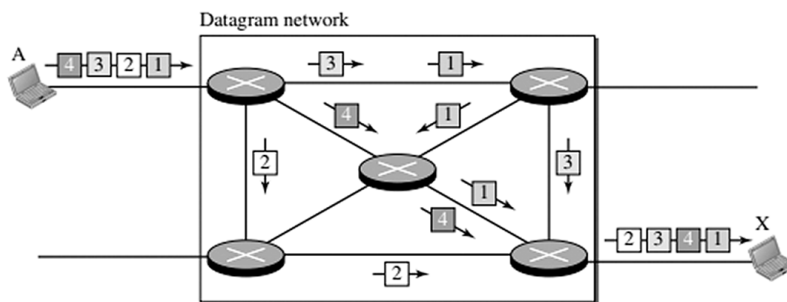
Existen dos técnicas para encaminar los paquetes por medio de la red de conmutación: la técnica de datagrama y la técnica de circuitos virtuales. **!**

Técnica de datagrama

En la técnica de datagrama cada paquete se trata de manera independiente, sin ninguna referencia a los paquetes anteriores, es decir, el emisor enumera cada paquete, añade información de control en una cabecera y lo envía hacia su destino. Los paquetes siguen caminos diferentes. Es probable que se reciban en orden diferente y, por lo tanto, que el destino deba reordenarlos. Asimismo, es posible que un paquete se pierda, debido a que algún nodo esté inactivo, entonces el destino deberá detectarlo e intentar recuperarlo. Para ello es necesario que posea las herramientas necesarias.

En la figura siguiente se muestra cómo la técnica de datagrama transmite cuatro paquetes desde la estación A hasta la estación X. En el ejemplo los cuatro paquetes (datagramas) pertenecen al mismo mensaje, pero pueden viajar por diferentes caminos para llegar al mismo destino. Así, cada nodo enviará los paquetes de manera independiente en función del ancho de banda de las interfaces de salida de los nodos en cada momento. Como consecuencia, en la figura se muestra el caso en el que los paquetes han llegado al destino desordenados.

Figura 8. Red de datagramas con cinco conmutadores



Las redes que trabajan con datagramas se suelen denominar también redes sin conexión (*connectionless networks*). El término *sin conexión* significa que el nodo de conmutación no mantiene información sobre el estado de la conexión y que cada paquete, como se ha dicho, se trata de manera independiente sin tener en cuenta el origen o el destino.

Es importante entender que el conmutador deberá tener unas tablas de conmutación, que estarán basadas en la dirección del destinatario para poder encaminar los paquetes de manera correcta.

Los conmutadores en las redes de datagramas utilizan tablas de encaminamiento basadas en la dirección de destino.

Figura 9. Tabla de conmutación en datagramas

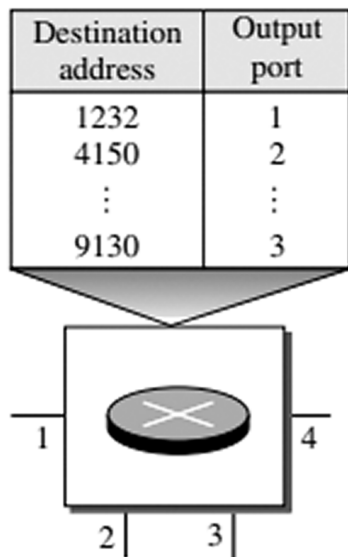
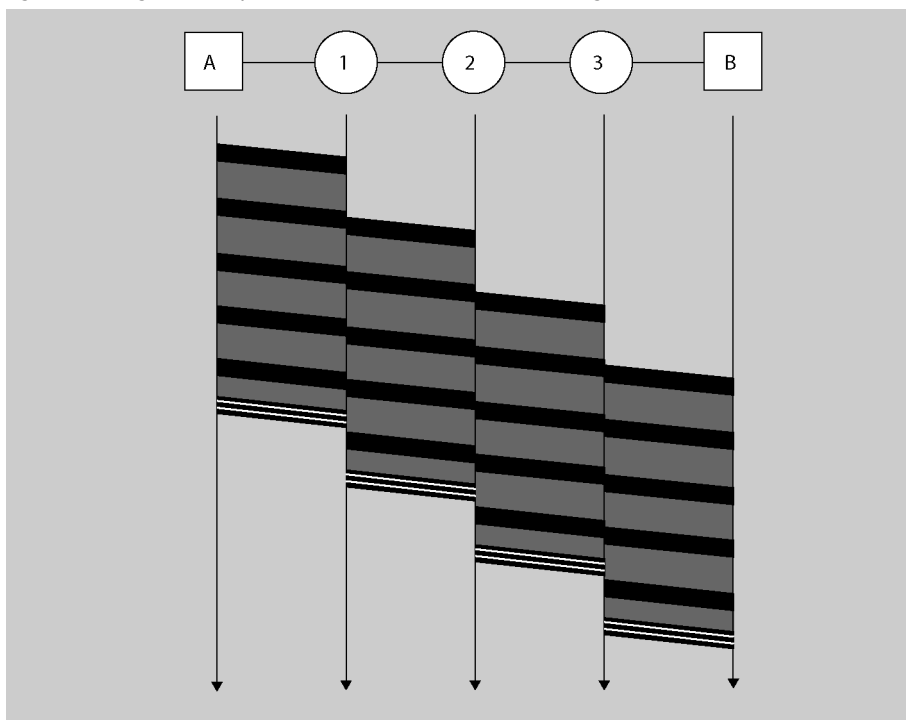


Diagrama temporal de una conexión en modo datagrama

En una conexión en modo datagrama el procedimiento que se sigue para la transmisión de la información es el que hemos comentado anteriormente:

- A envía un paquete al nodo 1. Éste lo almacena y a continuación lo transmite al nodo 2.
- Una vez A ha enviado el primer paquete al nodo 1, envía el siguiente paquete y así sucesivamente hasta transmitirlos todos.
- El mismo procedimiento se realiza en los otros enlaces entre nodos, hasta que el último nodo envía el último paquete al destino.

Figura 10. Diagrama temporal de una conexión en modo datagrama



Técnica de circuitos virtuales

El camino que siguen todos los paquetes pertenecientes a una comunicación se determina al inicio y se mantiene invariable a lo largo de la comunicación, como en la conmutación de circuitos. En este caso sólo se determina el camino, no se efectúa una reserva de recursos en exclusiva como sucedía en la conmutación de circuitos. De aquí el nombre de **circuito virtual**.

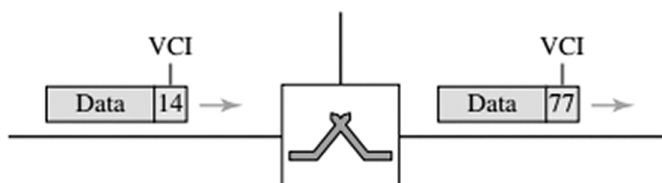
El equipo de origen envía un paquete de **petición de llamada** (*call request*) al primer nodo, este paquete se encarga de establecer un camino lógico de nodo en nodo hasta llegar al destino, y fija el camino por donde irán, uno a uno, todos los paquetes de datos. Si el destino acepta la petición, devuelve otro paquete de **llamada aceptada** (*call accept*) por los mismos nodos en sentido contrario. A partir de aquí se ha establecido un circuito virtual, similar a un circuito en una red de conmutación de circuitos, que permite la comunicación entre dos equipos sin que los nodos hayan de tomar decisiones de encaminamiento. Los mismos paquetes poseen un identificador de circuito virtual. La conexión finaliza cuando uno de los terminales envía al otro un paquete de **petición de liberación** (*clear request*). Cada equipo puede tener varios circuitos virtuales con el mismo destino, o con otros, simultáneamente. Tal como se puede ver, la principal característica de esta técnica es que el circuito se establece previamente a la comunicación. Además, el circuito sólo se establece por la duración de la conexión y no es de dedicación exclusiva como en la conmutación de circuitos.

Direccionamiento en circuitos virtuales

En las redes que trabajan con circuito virtual hay dos tipos de direccionamiento:

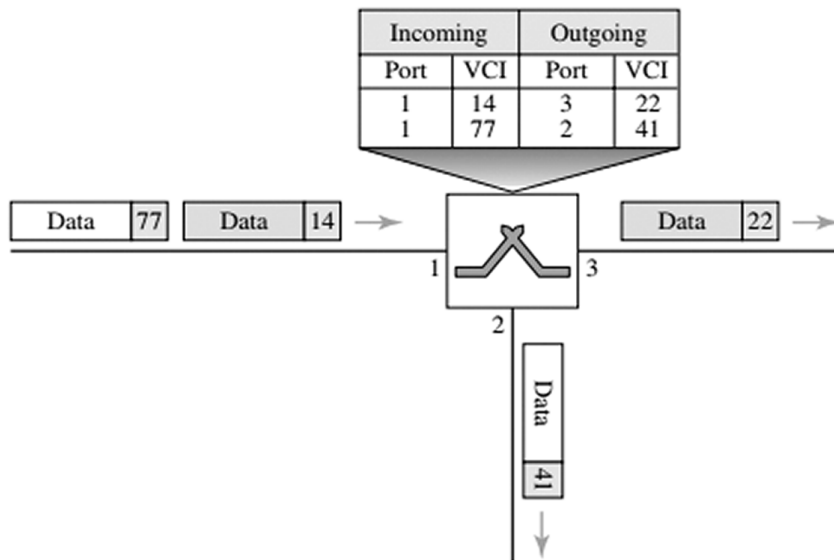
- **Direccionamiento global:** origen y destino necesitan una dirección global, que debe ser única dentro del alcance donde se trabaja. Esta dirección solo es necesaria para crear un identificador de circuito virtual que estará asociado a la conexión establecida.
- **Direccionamiento local:** se realiza mediante el identificador de circuito virtual (VCI). Este identificador, a diferencia de la dirección global, es un número pequeño que solo tiene como alcance el propio conmutador. Así, el VCI es usado por las tramas entre dos conmutadores. Cuando una trama llega al conmutador tiene un VCI, pero cuando deja el conmutador puede tener un VCI diferente. En la figura se muestra un ejemplo:

Figura 11. Identificador de circuito virtual



Para poder conmutar las tramas desde el origen hasta el destino, todos los conmutadores necesitan unas tablas de conmutación que contengan entradas para cada uno de los circuitos virtuales. Estas tablas tienen cuatro columnas, de modo que para cada circuito virtual hay que mantener la información siguiente: identificador de la trama (VCI entrante), puerto de origen por donde llega, puerto de salida y nuevo identificador de salida (VCI saliente).

Figura 12. Tablas de conmutación caso de circuito virtual



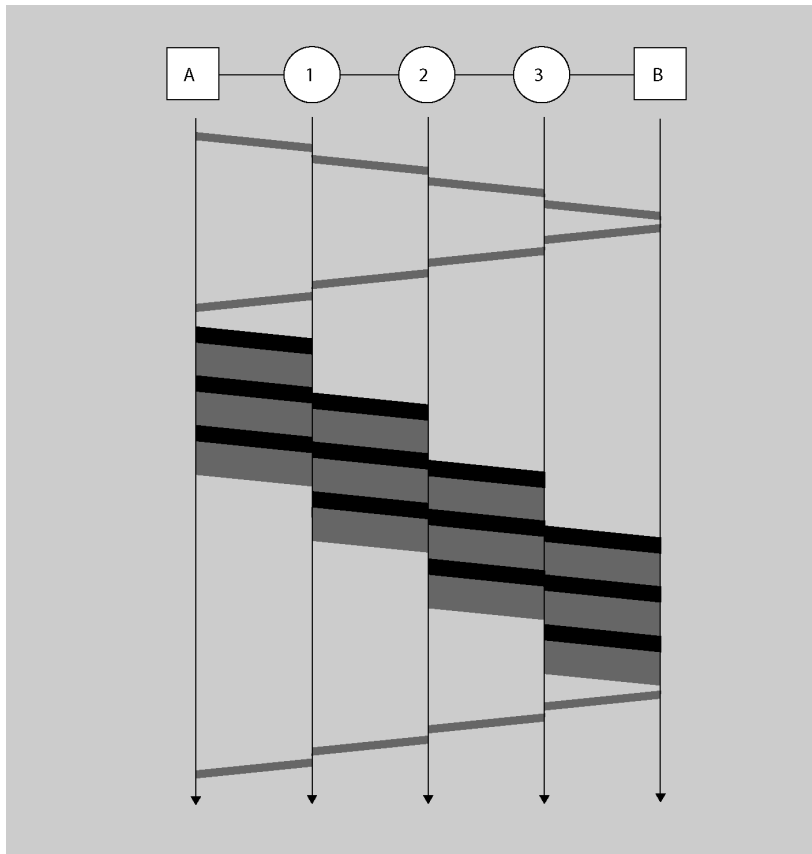
En la figura se ve una primera trama que llega por el puerto 1 con VCI = 14. El conmutador examina su tabla, extrae el VCI, incorpora el nuevo VCI = 22 y lo conmuta por el puerto 3. Tenemos una segunda trama que llega por el mismo puerto con VCI = 77; el conmutador examina su tabla, extrae el VCI, incorpora el nuevo VCI (en este caso VCI = 41) y conmuta el paquete por el puerto 2.

Diagrama temporal de una conexión en modo circuito virtual

En una conexión en modo circuito virtual el procedimiento que se sigue para la transmisión de la información es el siguiente:

- Inicialmente el equipo de origen (A) envía un paquete de petición de llamada que va atravesando los nodos hasta llegar al equipo de destino (B).
- El equipo destinatario (B) acepta la conexión enviando un paquete de llamada aceptada al equipo de origen por el mismo camino.
- Después de haber recibido la señal de aceptación, se inicia la transmisión de los paquetes.
- Finalmente, el equipo de destino envía un paquete de petición de liberación, que sirve para ir liberando los recursos utilizados.

Figura 13. Diagrama temporal de una conexión en modo circuito virtual



Las ventajas del circuito virtual respecto al datagrama son sobre todo para conexiones de períodos largos:

- Más rapidez en la transmisión. Como no es necesaria ninguna decisión de encaminamiento en los nodos, los paquetes viajan más rápidamente.
- Orden secuencial. Todos los paquetes llegan con el mismo orden de partida.
- Control de errores. En cada nodo se realiza la detección de errores, por lo tanto, si un paquete llega erróneo a un nodo, este nodo solicita la retransmisión al nodo anterior antes de continuar transmitiendo a los nodos siguientes.

Las principales desventajas del circuito virtual respecto al datagrama se producen en conexiones para un período corto:

- El datagrama no posee establecimiento ni liberación de llamada y por ello se efectúa más rápidamente.
- El datagrama es más flexible, ya que si se produce congestión en algún nodo permite enviar los paquetes por una ruta sin congestión.
- El envío por medio de datagrama es más seguro, ya que si un nodo falla, sólo un paquete o unos pocos paquetes se perderán; en cambio, en el caso

de los circuitos virtuales, si un nodo falla, todos los circuitos virtuales que atraviesan el nodo se perderán.

Las redes que trabajan con la técnica de datagramas ofrecen un servicio no orientado a conexión, mientras que las que trabajan con circuitos virtuales ofrecen un servicio orientado a conexión. Aunque parezca más conveniente que la red se encargue de todo y ofrezca un servicio orientado a conexión, muchas veces se prefiere la flexibilidad y la sencillez de un servicio no orientado a conexión, y dejar para niveles superiores al de red las tareas del control de errores y de la reordenación. De esta manera, se traspasa trabajo de los nodos a los equipos terminales y la red puede operar de manera más eficiente.

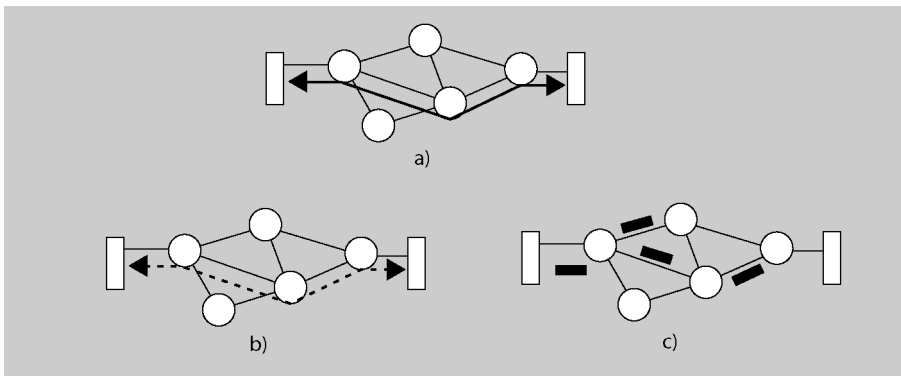
Representación de una conexión en diferentes modos de conmutación

El esquema a) de la figura 14 nos representa una conexión mediante una red de conmutación de circuitos en la que se reserva un camino en exclusiva para la transmisión de información entre el origen y el destino.

El esquema b) de la figura 14 nos representa el funcionamiento de una red de conmutación con circuitos virtuales. En este caso la reserva de los recursos no se realiza en exclusiva, pero también se crea un camino lógico previamente a la transmisión de la información. La transmisión de la información se efectúa por medio de paquetes que sufren un retardo en cada nodo intermedio.

El esquema c) de la figura 14 nos representa la conexión mediante conmutación de datagramas. No se necesita el establecimiento ni la liberación de la conexión, ya que cada paquete sigue un camino diferente.

Figura 14. Representación de una conexión en diferentes modos de conmutación



A continuación tenemos en forma de tabla la comparativa de las principales técnicas de conmutación:

	Conmutación de circuitos	Conmutación de paquetes: datagrama	Conmutación de paquetes: circuito virtual
Camino	Para toda la conversación	Para cada paquete	Para toda la conexión
Recursos	Dedicados	No dedicados	No dedicados
Transmisión	Continua	En paquetes	En paquetes
Establecimiento del camino	Previo a la transmisión	Un camino para cada paquete	Previo a la transmisión
Retardo en la transmisión	Negligible	Sí, variable	Sí, variable

Fiabilidad	Alta (posibles desconexiones)	Baja (posibles pérdidas y desorden de paquetes)	Alta (posibles desconexiones)
Anchura de banda	Fija	Dinámica	Dinámica
Información suplementaria (cabeceras)	No	Sí	Sí

Ejercicio

Se definen los parámetros siguientes:

- N : número de saltos
- L : longitud del mensaje (bits)
- H : cabecera (bits)
- P : longitud del paquete (bits)
- B : velocidad de transmisión de los enlaces (bps)
- S : tiempo de establecimiento del circuito (s)
- D : retardo de propagación por cada salto (s)

Suponed que los enlaces son de la misma longitud, que no hacen falta confirmaciones y que el retardo en los nodos es negligible. Obtened la expresión del retardo de la transmisión en conmutación de circuitos y en conmutación de paquetes mediante circuito virtual y datagrama.

Calculad los resultados para los valores siguientes: $N = 4$; $L = 3.200$ bits; $H = 16$ bits; $P = 1.024$ bits; $B = 9.600$ bps; $S = 0,2$ s; $D = 0,001$ s.

Retardo de transmisión en conmutación de circuitos:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{establecimiento}} + T_{\text{propagación}} + T_{\text{transmisión}} = S + N \cdot D + \frac{L}{B} = 0,2 + 4 \cdot 0,001 + \frac{3.200}{9.600} = 0,5373\text{s}$$

Retardo de transmisión en conmutación de paquetes en circuito virtual:

El número de paquetes, que denominaremos K , será la longitud del mensaje dividido por la longitud de cada paquete,

$$K = \frac{L}{P} = \frac{3.200}{1.024} = 3,125$$

Dado que el número de paquetes debe ser un número entero, tomaremos el valor entero por encima de 3,125. Por lo tanto, tomaremos $K = 4$ y calculamos el retardo:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{establecimiento}} + T_{\text{nodos}} + T_{\text{propagación}} + T_{\text{transmisión}} = S + 0 + N \cdot D + K \frac{P+H}{B} + (N-1) \frac{P+H}{B} =$$

$$0,2 + 4 \cdot 0,001 + 4 \frac{1.024+16}{9.600} + 3 \frac{1.024+16}{9.600} = 0,9623\text{s}$$

Retardo de transmisión en conmutación de paquetes en datagrama:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{nodos}} + T_{\text{propagación}} + T_{\text{transmisión}} = 0 + N \cdot D + K \frac{P+H}{B} + (N-1) \frac{P+H}{B} =$$

$$4 \cdot 0,001 + 4 \frac{1.024+16}{9.600} + 3 \frac{1.024+16}{9.600} = 0,7623\text{s}$$

1.2.4. Conmutación de celdas

La conmutación de celdas es una variante evolucionada de la conmutación de paquetes en la que estos paquetes son de longitud pequeña y fija, denomina-

dos **celdas**. Su tamaño permite una mejor precisión a la hora de asignar recursos a las comunicaciones y, por lo tanto, un buen aprovechamiento del ancho de banda. El tamaño fijo de las celdas facilita el uso de técnicas de conmutación muy rápidas. El ejemplo más relevante de esta técnica son las redes de banda ancha basadas en la tecnología ATM (*asynchronous transfer mode*).

1.3. Encaminamiento

El camino que seguirán los paquetes mediante la red depende de las decisiones que tomen los nodos de la red, que en función del lugar, del momento y del criterio que utilicen implicará que se den diferentes formas de encaminamiento de la información:

- Dependiendo del momento, podemos determinar:
 - En la técnica de datagramas se decide para cada paquete.
 - En la técnica de circuitos virtuales se decide en el establecimiento del circuito.
- Dependiendo del lugar, podemos determinar:
 - En todos los nodos (encaminamiento distribuido).
 - En el origen del paquete (encaminamiento de fuente).
 - A un nodo especializado de la red (encaminamiento centralizado).
- Dependiendo del criterio que se aplica para elegir el camino, podemos determinar:
 - El camino más corto. En este caso, el camino por el que se opta es el que incluye el número más pequeño de saltos entre nodos. Es un criterio bastante fácil de medir y pretende minimizar el número de recursos utilizados.
 - El coste más bajo. El criterio del coste más bajo asigna a cada enlace un coste, proporcional a alguna característica concreta, como la velocidad de transmisión o el retardo medio en la cola de entrada, y busca el camino con el coste total más bajo.

Un aspecto importante es que el encaminamiento se adapte a posibles cambios en cuanto a topología, o carga, en la red. Ello permite clasificar la forma de encaminamiento en **adaptativo** y **no adaptativo**.

A continuación veremos algunas de las estrategias que actualmente se utilizan en las diferentes redes de datos. Concretamente, de las estrategias no adaptativas veremos el encaminamiento estático y el *flooding* (inundación), y de las estrategias adaptativas veremos el encaminamiento adaptativo distribuido.

1.3.1. Encaminamiento no adaptativo

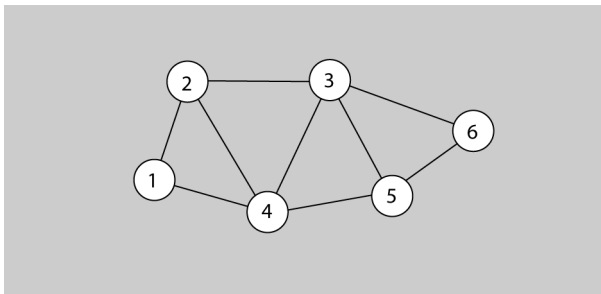
1) Encaminamiento estático

El encaminamiento estático consiste en decidir los caminos que se utilizarán para todas las conexiones posibles; es decir, para cada par de terminales, en el momento en el que se crea la red.

Para decidir los caminos que se deben seguir se puede aplicar tanto el criterio del coste mínimo, como el del camino más corto.

La información del camino entero no es necesario guardarla, sólo cabe saber, para cada nodo, cuál es el salto siguiente que han de dar los paquetes, y cada nodo basta con que tenga suficiente información sobre él mismo. Esta información se almacena en una **tabla de encaminamiento**. Para cada paquete que recibe, el nodo consulta la tabla de encaminamiento para saber qué debe hacer con aquél. Cuando el nodo recibe un paquete destinado a un determinado terminal, la tabla le indica el puerto por el cual ha de enviarlo, que corresponde al enlace que lo une directamente.

Figura 15.



Tablas de encaminamiento correspondientes a tres nodos de la red de la figura 15

Tabla del nodo 1		Tabla del nodo 2		Tabla del nodo 3	
Destino	Nodo siguiente	Destino	Nodo siguiente	Destino	Nodo siguiente
2	2	1	1	1	5
3	4	3	3	2	5
4	4	4	4	4	5
5	4	5	4	5	5
6	4	6	4	6	5

Cuando el nodo 2 de la figura 15 recibe un paquete que debe ir al de destino 5, consulta su tabla de encaminamiento, que le indica que ha de enviarlo al nodo 4. Si el nodo 3 recibe un paquete con destino a cualquier nodo, siempre lo enviará hacia el nodo 5.

2) *Flooding* o inundaciones

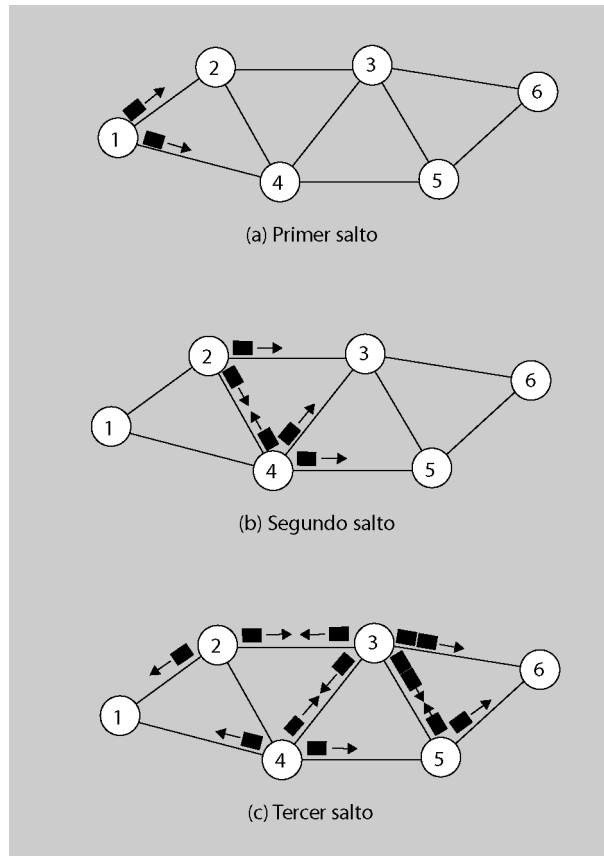
El encaminamiento por *flooding* consiste en el hecho de que cada paquete que llega a un nodo se envía a todos sus nodos vecinos.

Cuando se quiere enviar un paquete de un punto a otro de la red, la red se inunda con réplicas del paquete. Este algoritmo es muy sencillo. No necesita el uso de tablas y, además, soporta de manera óptima la caída de nodos o los cambios de la topología. El inconveniente principal es que la red se halla más cargada porque circulan múltiples copias de todos los paquetes simultáneamente.

Si la red tiene bucles cerrados y no se toman medidas, se colapsa enseguida, porque se generan copias de paquetes continuamente. Una manera sencilla de evitarlo es instalar un contador de saltos en cada paquete. Se puede inicializar a un valor máximo de la red, y cada vez que un nodo conmuta un paquete provoca que el contador disminuya de una unidad. Cuando el contador llega a cero, el nodo lo descarta.

Los receptores pueden recibir muchas copias del mismo paquete. Por lo tanto, deben identificarse, y en el momento de la recepción de un paquete se han de descartar todos los que sean iguales. Este identificador debe ser único en toda la red.

El *flooding* es un método muy robusto porque se prueban todas las rutas posibles entre el origen y el destino. Aunque un segmento de la red desaparezca, el resto de nodos se pueden continuar comunicando mientras haya un camino posible. Por ello se puede utilizar en situaciones en las que la robustez es importante, como aplicaciones militares o redes con topología muy cambiante. Como se prueban todos los caminos posibles para cada conexión, entre estos caminos existirá el de mínimo retardo. Esto implica que se pueda utilizar, por ejemplo, para establecer un circuito virtual entre dos nodos mediante el camino más corto.

Figura 16. Encaminamiento por *flooding*. Inundación de la red con réplicas

1.3.2. Encaminamiento adaptativo

Para que los algoritmos se puedan adaptar a las condiciones de trabajo, es preciso que los nodos se intercambien información sobre el estado de la red. Ello se convierte en un compromiso, ya que cuanto más información se intercambien y más a menudo, mejores serán las decisiones que se tomen, pero también será mayor el tráfico extra que se introduce en la red y, por lo tanto, el rendimiento será peor.

En la mayoría de estrategias de encaminamiento adaptativo los nodos obtienen la información sobre el estado de la red de los nodos vecinos.

De hecho, aunque la información que reciba un nodo en un instante proceda sólo de sus vecinos inmediatos, de alguna manera también está recibiendo información del resto de nodos, dado que el vecino recibe al mismo tiempo información de sus vecinos. La diferencia se halla en el tiempo que necesita un nodo para tener información de toda la red. Si este tiempo es largo, puede ocurrir que la adaptación a los cambios sea muy lenta. Un ejemplo es el encaminamiento adaptativo distribuido; otro es el direccionamiento jerárquico:

- **Encaminamiento adaptativo distribuido.** Se basa en el hecho de que los nodos elaboran las tablas de encaminamiento a partir de la información que periódicamente reciben de sus vecinos inmediatos. La información se basa en un parámetro de calidad de la red. Las tablas de encaminamiento se actualizan en cada intercambio de información, para que contengan siempre los mejores caminos posibles según el parámetro de calidad elegido.
- **Direccionamiento jerárquico.** Todas las estrategias que hemos visto hasta ahora tienen el problema de que si la red crece, las tablas de cada nodo crecen y el trabajo para mantenerlas actualizadas es cada vez más complejo. Una posible solución es el direccionamiento jerárquico. Con esta estrategia, las tablas de los nodos han de contener sólo una entrada para todos los terminales que se encuentran en una región diferente de la del mismo nodo. Incluir en la dirección del terminal una referencia a la región a la cual pertenece implica más rapidez en la consulta de las tablas y, por lo tanto, el encaminamiento de los paquetes.

Ejemplo de encaminamiento adaptativo distribuido

Un ejemplo de encaminamiento adaptativo distribuido es el de la red ARPANET, la red de conmutación de paquetes de donde ha surgido la actual Internet; el parámetro de calidad que utilizaba era la estimación de retardos.

Ejemplo de direccionamiento jerárquico

Un ejemplo de direccionamiento jerárquico es el de la red telefónica, que utiliza un esquema parecido en la numeración de los abonados. Los números de teléfono están compuestos por grupos de cifras que corresponden a diferentes regiones: el que corresponde a la provincia, a la central local y al abonado.

1.4. Control de tráfico

Podemos efectuar dos tipos de control sobre el tráfico que se da en una red de paquetes. Por una parte, podemos realizar un control de flujo, parecido al que se efectúa a nivel de enlace y, por otra, un control de congestión, necesario para que la red no se sature por exceso de entrada de paquetes y deje de funcionar correctamente.

1.4.1. Control de flujo

El objetivo del control de flujo es evitar que un emisor rápido colapse un receptor lento. Se trata de que el receptor pueda regular el caudal de datos que el emisor le hace llegar. El lugar natural donde se establece un control de flujo es la conexión punto a punto entre dos dispositivos y, por lo tanto, en el nivel de enlace. No obstante, en las redes de conmutación de paquetes en modo circuito virtual, como una vez establecida la conexión entre los extremos, la red se comporta como un enlace directo entre ellos, es habitual establecer un control de flujo en todo el circuito virtual. Esto permite que la aplicación particular receptora de la información pueda limitar el número de paquetes que llegan de manera dinámica.

1.4.2. Control de congestión

Hemos comentado que las redes de conmutación de circuitos presentan bloqueo cuando el tráfico aumenta. Ello quiere decir que llega un momento en el que no se admiten nuevas conexiones porque la red no las puede absorber, pero sin que este hecho afecte a las conexiones ya establecidas. En las redes de conmutación de paquetes, cuando el tráfico aumenta no se rechazan nuevas conexiones, circunstancia que provoca que las conexiones abiertas experimenten retardos mayores.

En conmutación de circuitos o en modo circuito virtual es habitual que coexistan diferentes controles de flujo, uno para cada enlace y uno para cada circuito virtual establecido. En cambio, en redes de conmutación en modo datagrama no tiene mucho sentido establecer un control de flujo de extremo a extremo, porque no todos los paquetes siguen el mismo camino.

Si nos fijamos en el rendimiento de una red, podemos observar que éste coincide con la carga ofrecida mientras no se llega al máximo de capacidad de la red. Si se sobrepasa este punto, por más paquetes que entren, la red no puede servir más. Ello no se puede mantener así, porque entran en la red más paquetes de los que salen, y las colas de los nodos son limitadas. Una vez llena una cola, los paquetes que no caben, o bien son descartados o bien son retenidos en el nodo anterior, si se establecen controles de flujo en cuanto al enlace. En el caso de descartarlos, esto provoca la retransmisión de los paquetes, e implica que el número de paquetes que entran en la red aumente todavía más. Si optamos por el control de flujo en el ámbito del enlace, lo que provocamos es que el problema se propague a otros puntos de la red, hasta que llegue a los equipos emisores, después de haber saturado todos los nodos intermedios. Por lo tanto, hagamos lo que hagamos, la red deja de ofrecer su capacidad máxima. El rendimiento cae y se habla de **congestión de la red**.

El hecho de añadir mecanismos de control a la red con el fin de evitar que se llegue al colapso provoca inevitablemente que no se pueda alcanzar el máximo rendimiento en condiciones normales de trabajo. Existen diferentes posibilidades para controlar la congestión de una red de conmutación, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

- **Realizar un control de flujo de extremo a extremo.** El efecto inmediato de este control sería la limitación del número de paquetes correspondientes a una conexión que circulan por la red.
- **Aprovechar los algoritmos de encaminamiento.** Éstos pueden utilizar la información sobre las cualidades de la red que se intercambian los nodos. Por ejemplo, si circula información sobre el retardo que se da en la entrada de un enlace, el algoritmo puede aprovecharla para disminuir la velocidad de transmisión de paquetes hacia aquel enlace.

El control de congestión

El control de congestión es un mecanismo que pretende evitar que el rendimiento de la red caiga cuando aumenta el tráfico.

- **Utilizar paquetes de regulación.** Se trata de enviar un paquete especial desde un nodo congestionado hacia los nodos que provocan la congestión. Al recibir un paquete de regulación, el nodo ha de disminuir su velocidad de transmisión, con el fin de reducir el número de paquetes que transmite al nodo congestionado.
- **Añadir información de congestión a los paquetes de datos.** Esta técnica es parecida a la anterior, sin embargo, no añade carga extra a la red, y no es tan versátil. Además, sólo tiene sentido en circuitos virtuales, porque la información de congestión se instala en los paquetes que van en sentido contrario.

1.4.3. Prevención de la congestión

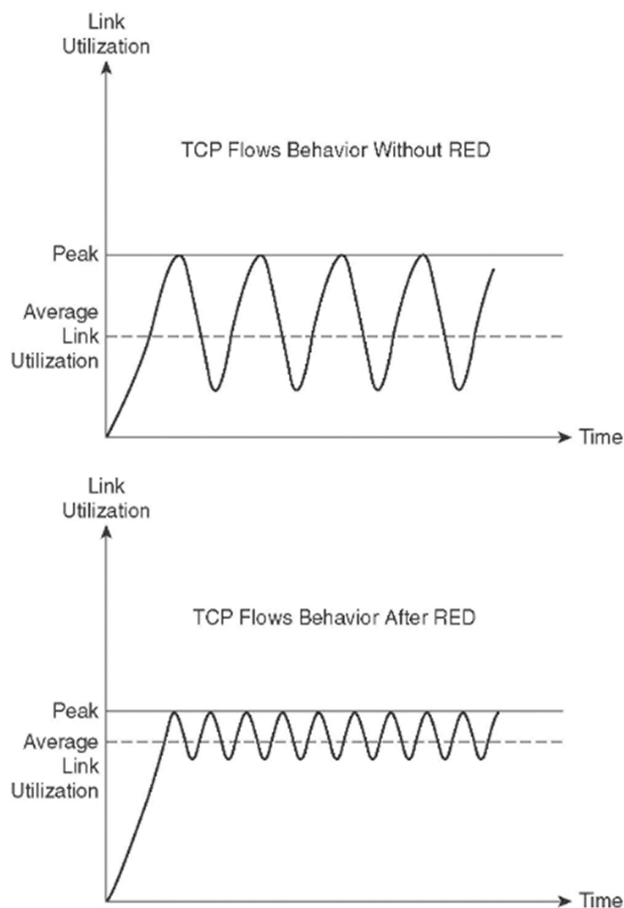
Tratar la congestión antes de que empiece es más efectivo que actuar cuando ya hay congestión. Esta idea ha llevado a un nuevo planteamiento destinado a descartar paquetes antes de que la cola del conmutador esté llena.

A partir de este planteamiento, el indicador más fiable de la congestión que tienen los dispositivos dentro de la red es el número de paquetes perdidos o el porcentaje de paquetes perdidos. Protocolos como TCP reaccionan a la congestión ralentizando el envío de paquetes de la fuente. TCP es un protocolo orientado a conexión, muy fiable, diseñado de forma que, si se pierden paquetes, considera que es porque los nodos intermedios tienen sus colas llenas y descartan paquetes, y no tanto porque haya errores de transmisión. La disminución del número de paquetes transmitidos por la fuente permite reducir la congestión. Si los conmutadores empiezan a descartar algunos paquetes antes de que la congestión se haya producido, podemos conseguir que las fuentes que generan el tráfico actúen (reduzcan la velocidad de transmisión de paquetes) antes de que sea demasiado tarde. Un algoritmo que aprovecha esta situación se denomina RED (*random early detection*). El conmutador, para saber cuándo debe empezar a descartar, monitoriza el valor de la longitud media de sus colas en función del uso. Cuando la longitud media de las colas empieza a aumentar y supera un determinado umbral, se considera que el enlace se empieza a congestionar y el conmutador descarta de manera aleatoria una pequeña fracción de los paquetes que le llegan. El hecho de descartar paquetes de manera aleatoria implica que sea más probable descartar paquetes de las fuentes que generan más tráfico que de las que generan menos. Además, en el momento en el que el nodo origen detecta la pérdida de paquetes (no recibe su reconocimiento), el protocolo TCP hará que reduzca la velocidad con la que envía paquetes.

En la figura siguiente, se muestra el comportamiento de un enlace sin RED y el de un enlace con RED. Si nos fijamos en el primer caso, observamos que la velocidad va aumentando hasta llegar al pico máximo de utilización. Una vez que llegamos a este punto se produce congestión y el nodo empieza a descartar

paquetes. Este hecho provoca, al mismo tiempo, que todas las fuentes que generan paquetes TCP y que pasan por este nodo ralenticen su envío de paquetes (detectan la pérdida de los paquetes descartados porque no reciben la confirmación). Automáticamente, esto provoca una bajada brusca de la utilización del enlace. Dado que existe esta disminución del tráfico, el sistema se descongestiona y vuelve a funcionar. Las fuentes vuelven a recibir reconocimientos de sus envíos, consideran que el enlace funciona correctamente y de nuevo incrementan la velocidad de envío hasta que otra vez se produce congestión. En la figura se ve este comportamiento con la forma de dientes de sierra que tiene la utilización del enlace en función del tiempo. En cambio, cuando se utiliza RED, se anticipa la congestión, se descartan algunos paquetes previamente y conseguimos que el diente de sierra en el tiempo no sea tan abrupto. En consecuencia, la utilización media del enlace mejora.

Figura 17. Utilización del enlace sin RED y con RED



2. Red telefónica conmutada (RTC)

2.1. Estructura y servicios de la red telefónica

La red telefónica se desarrolló para proporcionar el servicio de telefonía básica, que consiste en facilitar la comunicación oral entre los usuarios en tiempo real. Está basada en unos estándares de calidad y unas especificaciones recogidas en un conjunto de normas de la ITU. Este servicio más básico consiste en transmitir una señal analógica con un ancho de banda de unos 4 kHz por medio de los dispositivos de transmisión y conmutación que forman la red.

En cada país, el servicio telefónico lo ofrece un operador o más de uno, que con diferentes redes forman la red telefónica conmutada (RTC). La red telefónica opera basándose en la técnica de conmutación de circuitos, tal y como hemos comentado anteriormente.

El gran número de usuarios y el elevado tráfico en la RTC provocan que se deban estructurar agrupando el tráfico por zonas geográficas y hacerlas depender de diferentes centrales de conmutación que se hallen conectadas entre ellas o mediante otras. Una central admite un número de usuarios determinado y cuando se supera este valor son necesarias más centrales; estas centrales se han de interconectar para poder dar el servicio e implican que se precisen centrales de nivel superior para comunicarlas. Ello conlleva que aparezcan varios niveles en los que cada central de un nivel determinado depende de una central del nivel superior. Por razones de eficiencia y seguridad, la tendencia es la de establecer una red complementaria que interconecte centrales del mismo nivel con mucho tráfico entre ellas, como son las redes urbanas mediante las **centrales tándem** o para interconectar centrales separadas por dos o más niveles jerárquicos.

El acceso del usuario a la red se realiza conectando el terminal telefónico (o módem) a la **central local** mediante un cable de par trenzado que se denomina **lazo de abonado**. La longitud del lazo es corta, puede ser de kilómetros a decenas de kilómetros, y la transmisión se efectúa a baja frecuencia. La central local asigna los circuitos entre los usuarios que tiene conectados y al mismo tiempo establece las llamadas de sus abonados al resto de la red.

Las centrales locales se conectan a la **central primaria** por medio de circuitos de baja frecuencia y ésta asigna los circuitos entre los usuarios de la misma zona y al mismo tiempo establece las llamadas en el resto de la red. De la misma manera las centrales primarias se conectan a las **centrales secundarias** y éstas lo hacen en las **centrales terciarias** y en las **centrales internacionales**. Como se puede observar, la estructura de la red telefónica es **jerárquica**. A medida que las distancias son mayores y se necesita establecer más conexiones,

La estructura de la red telefónica es jerárquica.

los enlaces son de más capacidad, menos atenuación y más fiables, y se utiliza el cable coaxial, la fibra óptica o los radioenlaces. Los canales telefónicos se transmiten multiplexados en frecuencia (FDM) en el caso analógico, o en tiempo (TDM) en el caso digital.

El troncal de la red, formado por el conjunto de centrales de tráfico (de conmutación) y de enlaces entre ellas, tiende a estar interconectado de manera completa.

La red telefónica está diseñada específicamente para la transmisión de voz, aunque también ofrece la posibilidad de utilizar otros servicios, como son el facsímil, el datáfono, la transmisión de datos por medio de módem, la telemedicina, etc.

2.2. Planificación de la red telefónica

Los objetivos de la planificación de la red consisten en, dado un determinado tráfico y teniendo en cuenta las expectativas de crecimiento, determinar los recursos necesarios (enlaces, conmutadores...), minimizando el coste de la red y manteniendo un mínimo aceptable de calidad de servicio (QoS).

QoS son las iniciales de *quality of service*.

La calidad del servicio en la red telefónica posee dos componentes:

- **Calidad de conmutación.** Los centros de conmutación, tal como hemos comentado anteriormente, intentan asignar un circuito a un usuario que lo solicite. A veces, sin embargo, no es posible efectuar la asignación en el momento en el que se realiza la solicitud, dado que la red está ocupada o bloqueada. La probabilidad de bloqueo es uno de los parámetros que nos determinan la calidad de servicio y depende del número de usuarios, de los circuitos a los cuales pueden tener acceso y del funcionamiento de los centros de conmutación.
- **Calidad de transmisión.** El conjunto de circuitos y sistemas de transmisión pretende reproducir de la manera más fiel posible en el terminal remoto la señal generada por el terminal local. La calidad de transmisión dependerá tanto del nivel de señal utilizada, como del conjunto de perturbaciones que la afectarán.

Las especificaciones de calidad en el servicio telefónico se recogen en el **Plan de transmisión**.

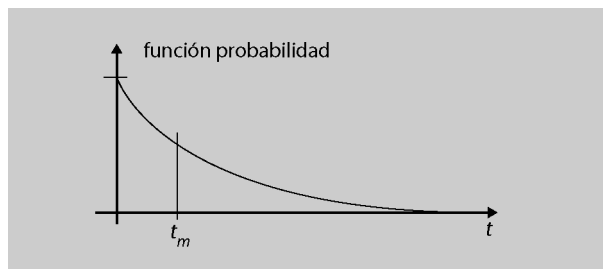
2.2.1. Tráfico

En la red telefónica se originan un conjunto de hechos que producen la ocupación de los sistemas de transmisión y de conmutación. La ocupación de los sistemas está directamente ligada al tráfico telefónico. Hablaremos de **congestión** de un sistema cuando éste está ocupado y no permite el establecimiento de ninguna conexión. Con el fin de poder cuantificar el tráfico, es preciso poder cono-

cer el proceso de aparición de las llamadas, su duración y el tratamiento que reciben las llamadas que no se realizan de forma inmediata a causa de la congestión. Esto no se puede predecir de forma individual pero sí que se puede efectuar de forma colectiva, estadísticamente, ya que el tráfico es aleatorio.

Para cuantificar el tráfico hemos de tener en cuenta dos aspectos importantes, la duración de las llamadas y la **tasa media de llegada de las llamadas**, λ . Supondremos que la duración de las llamadas telefónicas es aleatoria, con una función de probabilidad exponencial y una duración media, t_m .

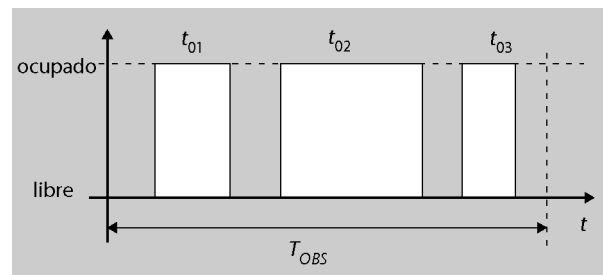
Figura 18. Función de probabilidad exponencial de duración media t_m .



Supongamos que observamos un sistema durante un tiempo, T_{OBS} . Podemos definir el **volumen de tráfico (V)** como el tiempo en el que un sistema está ocupado en un tiempo de observación, por lo tanto, como la suma de las duraciones de las llamadas en el tiempo de observación.

$$V = \sum_i t_{0i}$$

Figura 19. Representación temporal de la ocupación de un sistema en un tiempo T_{OBS}



El tráfico no se distribuye uniformemente a lo largo del día. El dimensionado de las redes se debe llevar a cabo para que se dé el mínimo bloqueo posible, por lo tanto, lo tenemos que dimensionar para las condiciones más desfavorables. Elegiremos como intervalo de observación la hora cargada.

La **intensidad de tráfico (A)** para un circuito en un intervalo de tiempo (T_{OBS}) determinado es el cociente entre el tiempo de ocupación y el tiempo de observación.

$$A = \frac{V}{T_{OBS}} = \frac{\sum_i t_{0i}}{T_{OBS}} = \lambda \cdot t_m$$

Hora cargada (HC)

La hora cargada es el período de una hora del día en el que el tráfico es más elevado, que suele estar en torno a las 12 h del mediodía.

A pesar de ser una magnitud sin unidades, habitualmente se expresa en Erlangs.

Unidades de medida de la intensidad de tráfico

De la definición de Erlang podemos deducir que la intensidad de tráfico en un circuito como máximo puede llegar a valer la unidad (1 Er = 60 minutos de tráfico en un circuito en la HC). Otra unidad de medida de la intensidad de tráfico es CCS (*centi call seconds*), que corresponde a un intervalo de ocupación de 100 segundos (1 Er = 36 CCS).

Si analizamos más de un circuito, entonces el volumen de tráfico cursado será la suma de los volúmenes de tráfico de los circuitos por separado. La intensidad de tráfico será también la suma de las intensidades de cada uno de ellos.

Un Erlang (Er) se define como el volumen de tráfico entrante en un circuito en la hora cargada.

2.2.2. Modelos

Tal como hemos comentado anteriormente, existen modelos matemáticos que nos interpretan los fenómenos que se pueden producir dentro de la red telefónica y nos permiten obtener expresiones que nos relacionan la probabilidad de pérdida o de espera en función de la intensidad de tráfico y del número de canales. Estas expresiones se llaman funciones de distribución y son simplemente un modelo probabilístico.

El modelo de Erlang-B es el modelo normalizado por la ITU-T utilizado en Europa y en gran parte de los países del mundo.

2.3. Sistema de transmisión

El objetivo principal de un sistema de transmisión es transportar la señal del origen al destino. Por lo tanto, es necesario adaptar la señal para que pueda ser transmitida por el medio y multiplexarla con otras señales con el fin de optimizar el canal de transmisión.

Podemos diferenciar dos tipos de enlaces que utilizan diferentes medios de transmisión:

- **Lazo de abonado:** par trenzado de cobre del abonado hasta la central local.
- **Red troncal:** cable coaxial, microondas, satélites y sobre todo fibra óptica forman los enlaces entre los diferentes nodos de la red. Por estos enlaces las señales se transmiten multiplexadas.

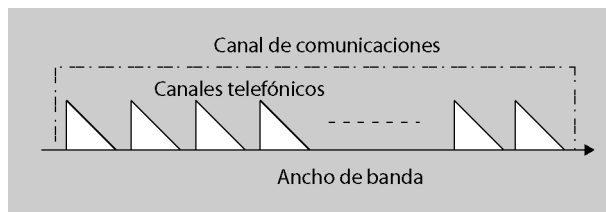
En la red telefónica se utiliza la transmisión síncrona y la multiplexación síncrona. Existen diferentes formas de multiplexar las señales, dependiendo del tipo:

- Multiplexación analógica (FDM)
- Multiplexación digital (TDM)
 - PDH (jerarquía digital plesiócrona)
 - SDH/SONET (jerarquía digital síncrona)

2.3.1. Multiplexación analógica (FDM)

La forma de transmitir de manera analógica los canales telefónicos se basa en la técnica de **multiplexación por división en la frecuencia (FDM)**.

Figura 20. Representación de la multiplexación por FDM de los canales telefónicos




Para cada sentido de la transmisión, cada canal vocal se modula en banda lateral única (SSB) utilizando una subportadora separada 4 kHz de las adyacentes, a fin de que se dé un margen de frecuencias libre entre canal y canal, es lo que se llama banda de guarda. Así, se forma lo que se denomina señal multiplex FDM, que es la que se envía a la red junto con el resto de señales de señalización.

La señal multiplex no se genera de manera arbitraria, sino que se realiza mediante un proceso de multiplexación de grupos de canales de forma jerárquica, normalizado por la ITU-T. En la primera fase se multiplexa un número de doce canales vocales para construir la señal multiplex de primera jerarquía, o denominada también **grupo primario** o **básico**. La segunda jerarquía se obtiene de agrupar multiplexando con FDM cinco grupos primarios de doce canales, se construye una señal de segunda jerarquía de sesenta canales y así sucesivamente hasta llegar a 2.700 canales.

Canal de voz	Ancho de banda (kHz)				
1	0-4	1 (12 canales)	1 (60 canales)	1 (300 canales)	1 (900 canales)
2	4-8	2 (12 canales)	2 (60 canales)	2 (300 canales)	2 (900 canales)
3	8-12	3 (12 canales)	3 (60 canales)	3 (300 canales)	3 (900 canales)
4	12-16	4 (12 canales)	4 (60 canales)		
5	16-20	5 (12 canales)	5 (60 canales)		
6	20-24				
7	24-28	Total	Total	Total	Total
8	28-32	60	300	900	2.700
9	32-36	canales	canales	canales	canales
10	36-40				
11	40-44				
12	44-48				
Grupo primario		Grupo secundario	Grupo terciario	Grupo cuaternario	Grupo quinario
Ancho de banda		Ancho de banda	Ancho de banda	Ancho de banda	Ancho de banda
48 kHz		240 kHz	1.200 kHz	3.716 kHz	12.026 kHz
60-108 kHz		312-552 kHz	312-1.512 kHz	312-4.028 kHz	312-12.338 kHz

Actualmente quedan pocos sistemas de transmisión analógicos y simplemente todavía existen por cuestiones de amortización.

2.3.2. Multiplexación digital (TDM)

La utilización de las señales digitales ha permitido introducir una nueva forma de multiplexar las señales, que es la **multiplexación por división en el tiempo (TDM)**. La trama que se crea, tal como se ha dicho anteriormente, se denomina **trama E1** (también se conoce con los nombres de CEPT-1 y PCM 30 + 2). 

CEPT es la sigla del Comité Europeo de Correos y Telégrafos.

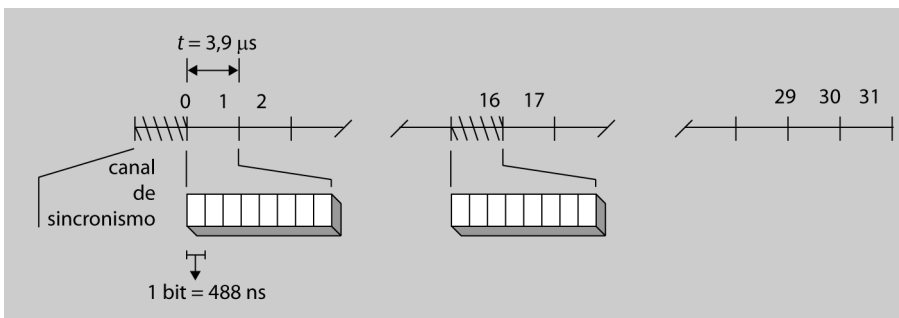
La norma G.732 de la ITU-T, o norma europea, indica cómo se debe obtener esta trama E1, que corresponde al primer nivel jerárquico, que multiplexa 30 canales de voz, un canal de señalización y uno de sincronismo, todos a 64 kbit/s.

Las principales características de la trama E1 son las siguientes:

- 32 canales por trama: 30 canales de voz, 1 de señalización y 1 de sincronismo.
- Utiliza 8 bits por muestra, por lo tanto, 256 bits por trama.
- Frecuencia de muestreo de 8 kHz.
- Longitud de la trama 125 μ s.
- Ley de compresión tipo A.
- Velocidad de transmisión total: $32 \times 64 \text{ kbits/s} = 2,048 \text{ Mbits/s}$.

La distribución de los canales la encontramos en la figura 21.

Figura 21. Representación de la trama E1



2.3.3. Jerarquía digital plesiócrona (PDH)

Vista la dificultad de mantener el sincronismo dentro de la red telefónica, aparece el modo de operación plesiócrono y la jerarquía digital plesiócrona. Los multiplexores combinan enlaces con pequeñas variaciones de velocidad añadiendo bits vacíos extra en los enlaces más lentos.

La *plesyochronous digital hierarchy* (PDH) es como se denomina la jerarquía de multiplexación de órdenes superiores. Las tramas E1, tal como realizábamos con FDM, se pueden agrupar con el fin de poder transmitir o bien más canales, o bien canales de más ancho de banda, como puede ser el vídeo. Para generar un orden jerárquico superior se multiplexan cuatro tramas de la orden anterior de manera que formen una nueva trama. Su ancho de banda no es múltiplo del ancho de banda de los canales multiplexados. Esto se debe al hecho de que para pasar de un nivel al otro es necesario añadir información de uso exclusivo del nivel superior. Ello implica que los relojes de los diferentes niveles sean independientes entre ellos. Cada nivel es síncrono, sin embargo, no lo es el sistema global.

La palabra *plesiócrona* indica casi síncrona.

La norma europea parte del grupo básico de 2,048 Mbits/s. Genera el grupo secundario (E2) con cuatro grupos primarios (E1), el grupo terciario (E3) con cuatro grupos secundarios (E2), y así sucesivamente.

Orden	Velocidad de transmisión	N.º de bits por trama	Duración de trama en ms	N.º de canales
1	2,048 Mbits/s	256	125,00	30
2	8,448 Mbits/s	848	100,38	120
3	34,368 Mbits/s	1.536	44,69	480
4	139,264 Mbits/s	2.904	20,85	1.920
5	564,992 Mbits/s	2.688	4,70	7.680

La PDH presenta el problema de que es difícil extraer un canal de un grupo de canales multiplexados, ya que debe realizarse nivel a nivel, dado que las tramas son diferentes para cada nivel de multiplexación. Este es uno de los principales problemas que tiene la RDSI de banda estrecha. Por este motivo la RDSI de banda ancha utiliza la jerarquía digital síncrona (SDH), porque tiene sincronismo en todos los niveles de la red y, tal como veremos posteriormente, evita estos problemas.

2.4. Evolución de la red telefónica

En la mayoría de los países la red pública está formada por un conjunto de redes separadas, cada una de ellas especializada en algún tipo de tráfico, que poseen esquemas de numeración propios y necesitan accesos diferentes. Esto provoca un incremento de costes de gestión y de las instalaciones del usuario; además, la sociedad cada vez requiere más servicios y mejores.

Se pretende evolucionar hacia una red de telecomunicaciones única y universal que integre todos los servicios. Se está trabajando para desarrollar una red capaz de soportar todos los servicios de telecomunicaciones.

La evolución de la RTC a una red digital se lleva a cabo en diferentes etapas según las necesidades de los usuarios, la evolución tecnológica y la reglamentación internacional. Las etapas principales son tres:

- La red digital integrada (RDI)
- La red digital de servicios integrados de banda estrecha (RDSI-BE o RDSI)
- La red digital de servicios integrados de banda ancha (RDSI-BA)

La RDI es una red basada en la red telefónica conmutada que se ha ido digitalizando progresivamente desde los medios de transmisión, pasando por las centrales de conmutación, hasta los sistemas de señalización. Por lo tanto, la RDI es una red con medios de transmisión y de conmutación digitales.

La RDI se puede considerar un conjunto de redes digitales específicas, cada una dedicada a proporcionar un servicio al abonado. De todas maneras, el bucle de abonado continúa siendo analógico. La conmutación digital se da tanto en las centrales locales como en las de tránsito. Esta es la situación más común en la actualidad.

En cualquier caso, la evolución es hacia la conexión digital de extremo a extremo, que nos la proporcionará la RDSL.

2.5. xDSL

Una red de acceso es una red de conmutación de paquetes que proporciona conectividad con alta velocidad a los hogares. La red de acceso tiene diferentes características y requerimientos diferentes a las redes LAN, MAN o WAN.

Se ha desarrollado una familia de módems conocida como xDSL (*x-type digital subscriber line*) para proporcionar acceso a Internet con alta velocidad sobre la línea telefónica. Dentro de esta familia de módems, el ADSL es el más popular.

2.5.1. Tecnología DSL

En el desarrollo de una red digital pública de área extendida con alta velocidad, el enlace entre el abonado y la red supone un gran reto en la implementación: **red de acceso del usuario**. Eso es debido, como podéis imaginar, al gran número de abonados potenciales. Sólo el hecho de pensar en instalar nuevos cables para cada usuario hace desistir a cualquier operadora. La solución es intentar aprovechar el cable de par trenzado existente y que enlaza a casi todos los usuarios o empresas con la red telefónica. Estos enlaces fueron instalados para transportar la señal de voz en un ancho de banda de 0 a 4

El Foro ADSL

Este foro se estableció en 1994. En 1999 pasó a llamarse Foro DSL. El objetivo del foro es proporcionar un abanico de tecnologías DSL diseñadas para transmitir servicios de banda ancha para diversas situaciones y aplicaciones.

kHz; lo cual no quiere decir que estos cables no puedan transmitir señales en espectros más amplios.

La xDSL es un grupo de tecnologías módem diseñadas para permitir la transmisión de datos digitales a alta velocidad a través del cable telefónico convencional.

El ADSL (*asymmetric digital subscriber line*) es la tecnología más conocida dentro de esta familia denominada xDSL (*x-type digital subscriber line*), donde x coge un valor del alfabeto e indica la técnica de transmisión.

La ventaja principal de esta tecnología con respecto a otras soluciones de acceso es que se implementa sobre una infraestructura que ya existe (el bucle local).

Básicamente, lo que hace es usar el ancho de banda adicional por encima de los 4kHz hasta 1 MHz para transmitir servicios de datos a alta velocidad sobre el par de cobre.

Como sabéis, la transmisión se puede diferenciar entre si es de subida (*upstream*) o de bajada (*downstream*).

A la vez, se puede dividir en dos categorías:

- Simétrica: subida y bajada a la misma velocidad.
- Asimétrica: subida y bajada a diferente velocidad. Normalmente, la bajada suele ser a mayor velocidad.

2.5.2. ADSL

Como su nombre indica, el término asimétrico está asociado al hecho de que el ADSL proporciona más capacidad de transmisión al enlace descendente que al ascendente. La tasa de datos depende de la longitud del enlace del par trenzado, de la calidad del cable, de las interferencias, etc.

La tasa del ADSL ha sido mejorada con dos nuevos estándares: ADSL2 y ADSL2+.

El ADSL fue originariamente diseñado para proporcionar servicios de vídeo bajo demanda transportado sobre líneas conmutadas E1 o DS1. Este tipo de tráfico en el estándar ADSL se llama tráfico STM.

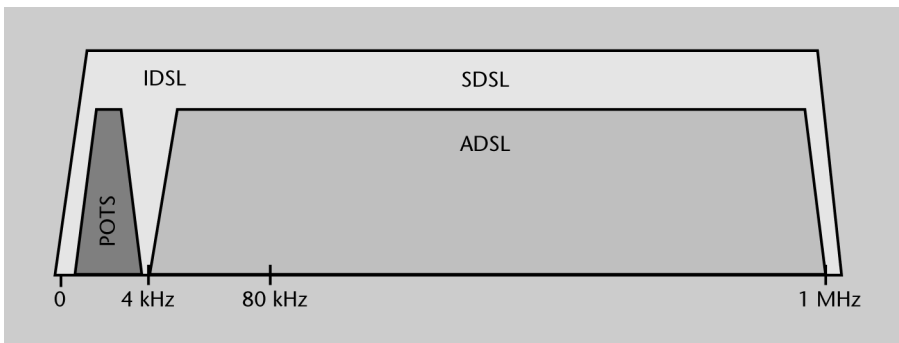
STM es la sigla de *synchronous transfer mode*.

El ADSL hace uso de la multiplexación por división en frecuencia (FDM) para aprovechar la capacidad del cable de par trenzado hasta 1 MHz. Hay tres elementos:

- reserva de los 25 kHz inferiores para voz (aunque la voz transmite sólo en la banda 0-4 kHz, se deja margen para evitar diafonía entre los canales de voz y los datos);
- uso de la cancelación del eco para dar cabida a dos bandas: una ascendente pequeña y otra descendente mayor;
- uso de FDM en las dos bandas: ascendente y descendente.

En la figura siguiente se muestra la asignación del ancho de banda para una línea ADSL.

Figura 22. Asignación de anchos de banda para ADSL



Cuando se usa la cancelación del eco, la banda de frecuencias que corresponde al canal ascendente se solapa con la porción inferior del canal descendente. Esto presenta un par de ventajas comparado con los casos de bandas de frecuencias diferentes para enlaces descendentes y ascendentes.

- Como hay un aumento de la atenuación con la frecuencia, con la utilización de la cancelación del eco tenemos una mayor parte del enlace descendente que se encuentra en la banda baja del espectro.
- El diseño del procedimiento de cancelación del eco es más flexible para modificar la capacidad de transmisión ascendente.

Evidentemente, no todo son ventajas, y lo que está claro es que el uso de la cancelación del eco obliga a la existencia de una lógica de cancelación del eco en las dos bandas de la línea.

La conexión ADSL está formada por un par de módems en cada extremo de la línea. En el extremo del usuario se llama ATU-R (ADSL *transceiver unit, remote terminal*). En el extremo de la operadora se llama ATU-C (ADSL *transceiver unit, central office*). Los ATU-R se agregan por medio de un multiplexor de acceso DSL, que se conoce como DSLAM. Así, el DSLAM está situado en la central de la operadora y concentra las conexiones de múltiples suscriptores DSL. El DSLAM es un conmutador ATM. Este conmutador tiene una línea OC3/STM-1 o superior conectada a la red *backbone*, y por el otro

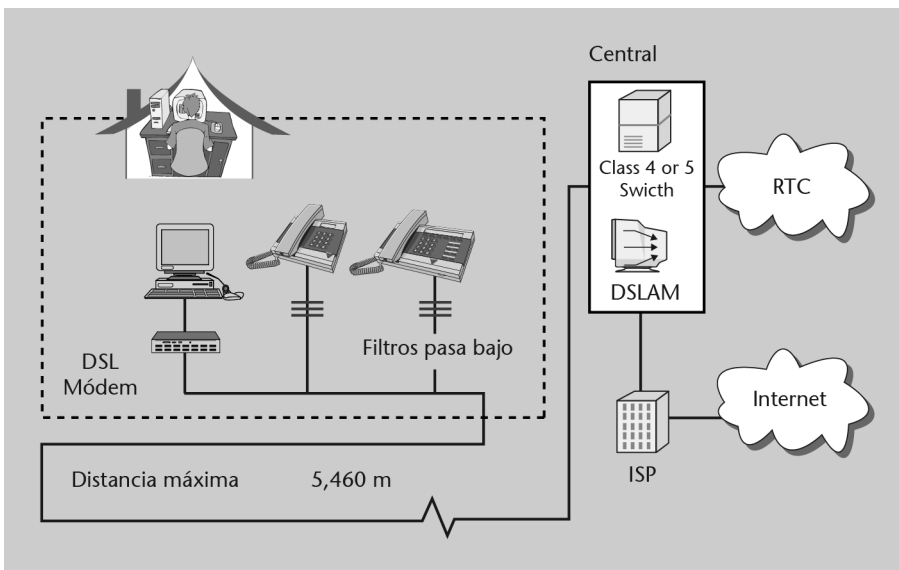
DSLAM es la sigla de DSL access multiplexer.

lado, líneas ADSL que le permiten dar servicio a un número determinado de usuarios.

El DSLAM combina las conexiones individuales de los usuarios con una línea de alta velocidad en Internet.

En la figura siguiente se muestran los elementos básicos para una conexión ADSL.

Figura 23. Elementos de una conexión ADSL



La ventaja del DSL sobre la conexión de cable es que el medio no es compartido. Añadir usuarios no baja el rendimiento siempre y cuando la conexión a Internet esté bien dimensionada.

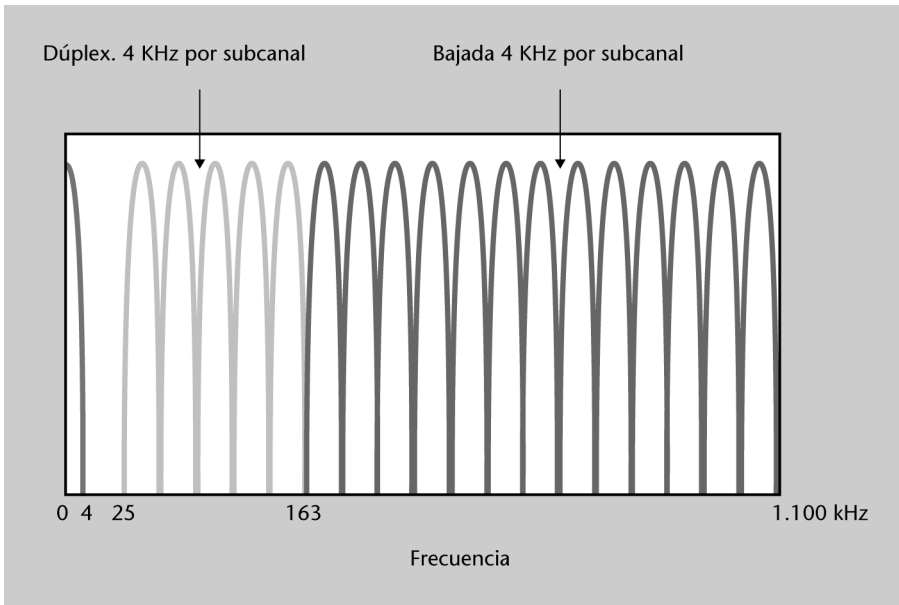
Multitono discreto

La técnica de multitono discreto (DMT) es la técnica de codificación de línea utilizada en ADSL.

DMT es la sigla de *discrete multitone*.

Consiste en usar las diversas señales portadoras a diferente frecuencia, de manera que se envían algunos de los bits en cada canal. El ancho de banda disponible se divide en subcanales de 4 kHz, llamados tonos. En el proceso de inicialización, el módem DMT envía señales de test sobre los subcanales con el objetivo de determinar la relación señal-ruido en cada uno de ellos. Una vez hecho el test, el módem asigna más bits de datos a los canales con mejor calidad de transmisión de señal y un número de bits menor para aquellos canales de calidad inferior.

Figura 24. Asignación de subcanales para todo el rango de frecuencias



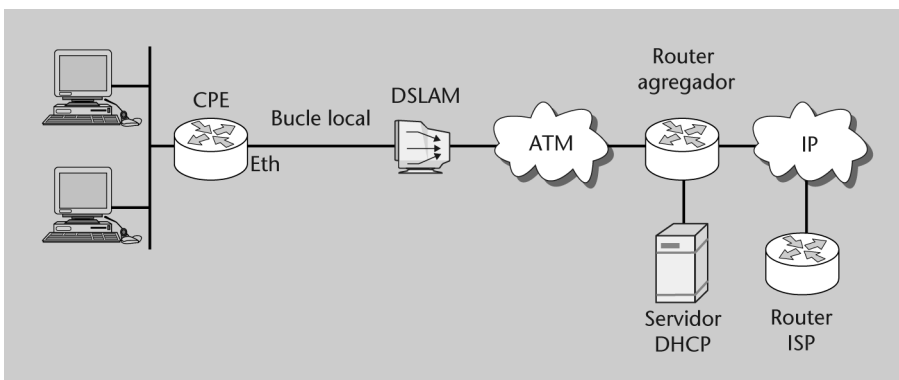
Cada subcanal puede llevar datos a una velocidad que va de 0 a 60 Kbps. Lo normal es un aumento de la atenuación con la frecuencia y, por lo tanto, un decremento en la relación señal-ruido a altas frecuencias. La consecuencia es una disminución de la velocidad de datos a altas frecuencias.

El diseño ADSL/DMT actual usa 256 subcanales descendentes.

Datos sobre ADSL. Encapsulamiento

La mayoría de las redes ADSL utilizan ATM como protocolo de capa de enlace. En términos básicos, un DSLAM, como ya se ha comentado anteriormente, es un conmutador ATM con tarjetas ADSL. El DSLAM recibe las conexiones ADSL y entonces conmuta el tráfico sobre una red ATM hacia un router llamado de agregación.

Figura 25. Componentes de la red ADSL



Las dos posibilidades más comunes para encapsular paquetes IP sobre ATM y conexión ADSL son:

1) PPP sobre Ethernet (PPPoE). El PPPoE es un protocolo de red que encapsula tramas PPP en tramas Ethernet. El PPPoE proporciona autenticación, encriptación y compresión. Es una solución usada en servicios ADSL que requiere instalar un software en el cliente.

2) PPP sobre ATM (PPPoA). El PPPoA es un protocolo de red que encapsula tramas PPP en ATM AAL5. El PPPoA proporciona autenticación, encriptación y compresión. El PPPoA es una solución encaminada. Con el PPPoA el router del usuario encamina los paquetes desde el PC de usuario sobre ATM hacia el router de agregación. El PPPoA no requiere ningún software en el cliente, como en el caso de PPPoE. Se usa tanto en servicios de cable, como en DSL y ADSL.

Existen nuevos estándares ADSL que ofrecen mejoras con respecto al ADSL convencional:

- ADSL2. Proporciona una tasa de bajada de hasta 12 Mbps a una distancia máxima de 2,5 Km.
- ADSL2+. Proporciona hasta 24 Mbps a una distancia máxima de 1,5 Km.

2.5.3. Familias xDSL

Esta línea de tecnologías forma una familia denominada xDSL (*x-tipo, digital subscriber line*). Es importante destacar que las velocidades xDSL varían en función de las características físicas de los bucles locales. El xDSL es un conjunto de soluciones basadas en el cobre.

La tabla siguiente muestra estas tecnologías en orden cronológico:

Nombre	Significado	Velocidad	Modo	Comentario
HDSL/HDSL2	DSL de alta velocidad	1,544 Mbps	Simétrico	Utiliza dos pares de hilos.
		2,048 Mbps	Simétrico	El HDSL2 utiliza un par de hilos.
SDSL	DSL de par único	768 kbps	Simétrico	Utiliza un par de hilos.
ADSL	DSL asimétrico	De 1,5 Mbps a 8 Mbps	Sentido <i>downstream</i> (descendente)	Utiliza un par de hilos.
		De 16 Kbps a 640 Kbps	Sentido <i>Upstream</i> (ascendente)	Mínima longitud de bucle: 5,5 Km.
RADSL	DSL de velocidad adaptable	De 1,5 Mbps a 8 Mbps	Sentido <i>Downstream</i> (descendente)	Utiliza un par de hilos, pero puede adaptar la velocidad de datos a las condiciones de la línea.
		De 16 Kbps a 640 Kbps	Sentido <i>Upstream</i> (ascendente)	
CDSL	DSL de consumidor	Hasta 1Mbps	<i>Downstream</i>	Utiliza un par de hilos, pero necesita equipos remotos en casa.
		De 16 a 128 Kbps	<i>Upstream</i>	

IDSL	DSL de RDSI	Igual que la interfaz básica (BRI) de RDSI	Simétrico	Utiliza un par de hilos.
VDSL	DSL de muy alta velocidad	De 13 a 52 Mbps	<i>Downstream</i>	De 300 a 1300 m de longitud máxima de bucle. Para funcionar necesita una red de fibra y ATM.
		De 1,5 a 6 Mbps	<i>Upstream</i>	

2.5.4. Factores que afectan al rendimiento de la DSL

Todos los tipos de DSL están limitados por la distancia y la velocidad. La velocidad es inversamente proporcional a la distancia.

Hay diversos elementos en el bucle local que atenúan o distorsionan la señal y, por lo tanto, también afectan a la máxima velocidad de las conexiones DSL:

- **Atenuación.** La señal se atenúa con la distancia; por lo tanto, a más distancia menos velocidad.
- **Múltiples pares (*bridge tap*).** Extensiones añadidas al bucle local. Puede causar ruido y reflexiones que bajan la calidad de la señal.
- **Grueso del cable (*wire gauge*).** Es importante la calidad del cable en cuanto al grueso usado en el bucle local.
- **Pérdidas de retorno.** Pérdidas debidas a la desadaptación de impedancias entre los dos extremos.
- **Diafonía (*crosstalk*).** Interferencia entre pares. La señal que emite un par induce señales al otro par.

3. Frame relay

3.1. Evolución de la X.25

X-25 es el protocolo estándar más conocido y más utilizado, aprobado en 1976 y modificado varias veces. Este estándar especifica la interacción entre un DTE (equipo terminal de datos del usuario) y un DCE (equipo de comunicación de datos) en una red de conmutación de paquetes. Es decir, que especifica la interfaz entre el terminal y la red de conmutación de paquetes; sin embargo, no define las características propias de la red de paquetes.


El estándar X.25 está organizado como una arquitectura a tres niveles, que corresponden a los niveles más bajos del modelo OSI, los niveles físico, de enlace y de red. Destaca el protocolo de nivel de enlace, que es el LAPB. Tanto los protocolos de nivel de enlace como de red facilitan mecanismos de control de errores, control de flujo y fiabilidad. El hecho de introducir todos estos mecanismos de control en el nivel de enlace y de red proporciona un sistema de mucha fiabilidad pero, al mismo tiempo, introduce una sobrecarga considerable que provoca una disminución del rendimiento.

LAPB

LAPB son las siglas de *link access procedure balanced*, que es el protocolo de nivel de enlace de X.25.

3.1.1. Principales características de la X.25

X.25 utiliza la técnica de conmutación de paquetes orientada a conexión. El primer paquete que se envía, que es el paquete de establecimiento de llamada, fija el circuito virtual que conectará a los usuarios. El resto de paquetes pasarán por este mismo circuito, de forma que no habrá que tomar ninguna decisión de encaminamiento más y llegarán a su destino en el mismo orden secuencial que se habían enviado.

X.25 permite el uso de dos tipos diferentes de circuitos virtuales: 

- **Circuitos virtuales permanentes (PVC).** Son enlaces lógicos entre un origen y un destino donde se ha prefijado un tipo de servicio por parte del administrador de red. No se dan fases de establecimiento de llamada y desconexión, sólo la fase de transmisión de datos: un PVC siempre está presente, incluso cuando no se transmiten datos.
- **Circuitos virtuales conmutados (SVC).** Son conexiones que se establecen en la red temporalmente mediante un canal lógico libre. En este caso se definen las tres fases: establecimiento de llamada, transmisión de la información y desconexión. Un SVC se establece bajo demanda del usuario.

Existen dos tipos de circuitos virtuales: permanentes (PVC) y conmutados (SVC).

3.1.2. Comparación entre X.25 y *frame relay*

El *frame relay* (FRL) se puede considerar la primera adecuación de las redes de datos a las nuevas tecnologías. Teniendo en cuenta que las infraestructuras son cada vez más fiables y de más calidad, y dado que los usuarios disponen de terminales adelantados, ha provocado que se consideren los terminales de los usuarios como parte de la red que transfiere la información, y, por lo tanto, se cede el control de flujo y de errores a los terminales. La red sólo ha de transmitir y conmutar los datos, no es necesario el retorno del paquete de confirmación, por lo tanto, tiene una sobrecarga menor.

En *frame relay* la señalización de control de llamada se envía por una conexión lógica separada de la conexión de datos. En cambio, en X.25 los paquetes de control y de datos se envían por el mismo circuito.

En X.25 la multiplexación de circuitos virtuales se lleva a cabo en el nivel de red, mientras que en FRL se elimina prácticamente el nivel de red y se efectúan la multiplexación y la conmutación de conexiones lógicas en el nivel de enlace. Ello provoca el ahorro de toda una capa de procesamiento y agiliza la multiplexación.

Una de las aplicaciones en las que FRL ofrece prestaciones muy por encima de X.25 es en redes LAN. Estas redes generan flujos de datos esporádicos (a ráfagas) y el ancho de banda debe adaptarse a cada necesidad; ello se permite por el hecho de que utiliza la multiplexación estadística. El FRL ajusta el ancho de banda al de las diferentes aplicaciones. El usuario tiene garantizada una velocidad media de transmisión. Otra ventaja es su velocidad de transmisión, ya que se diseñó para ofrecer velocidades entre 64 kbits/s y 2 Mbits/s, aunque se pueden conseguir velocidades más elevadas.

Multiplexación estadística

La multiplexación estadística permite obtener la anchura de banda que se necesita, cuando sea necesaria, sin necesidad de reservarla previamente.

Las principales ventajas del FRL sobre X.25 son las siguientes:

- FRL ofrece velocidades mayores.
- FRL trabaja sólo en el nivel físico y de enlace, lo que permite que pueda utilizarse como red troncal para protocolos en el nivel de red. Ejemplo: TCP/IP.
- FRL permite datos a ráfagas.
- FRL permite un tamaño de trama de 9 kbytes, por lo tanto permite tramas de todas las LAN.
- FRL es más económico que las otras redes WAN.

Las desventajas del FRL son las siguientes:

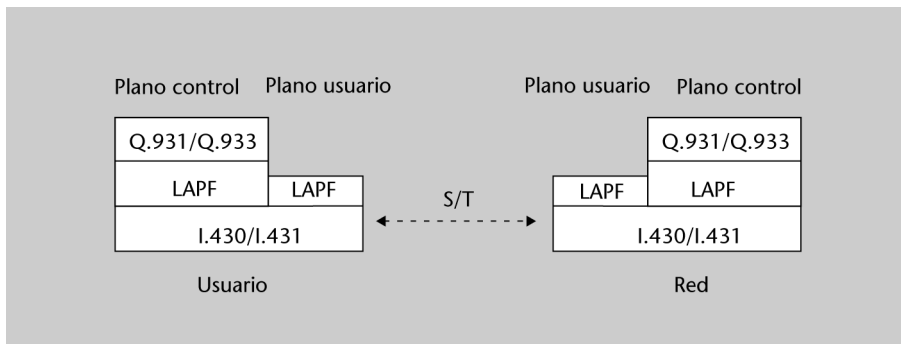
- La velocidad no es suficiente para protocolos como el de la RDSI-BA.
- Las unidades de datos son las tramas, o *frames*, de longitud variable; esto permite interconectar diferentes tipos de redes (LAN o WAN) que utilicen

tramas de diferentes dimensiones. Estas diferencias de longitud provocan retardos variables en la transmisión que dificultan la transmisión en tiempo real.

3.2. Protocolos del *frame relay*

De la misma manera que X.25, *frame relay* define el proceso de interconexión entre los terminales del usuario y la red de conmutación de paquetes, pero no define cómo circula la información dentro de la red de conmutación de paquetes una vez ha llegado a la red del proveedor de servicios. De esta manera define una arquitectura de protocolos en la interfaz UNI para poder proporcionar los servicios y las facilidades a los usuarios conectados.

Figura 26. Protocolos utilizados en la interfaz UNI



El servicio ofrecido está dividido en dos planos que utilizan el mismo medio físico: el plano de usuario y el plano de control. Define los tres primeros niveles, eliminando prácticamente el nivel de red y parte del nivel de enlace, y algunas funciones las baja del nivel 3 al nivel 2. Por ello es tan rápido, ya que se reducen mucho las funciones que ha de realizar.

1) **Plano de control.** Es el encargado de realizar las funciones de establecimiento y liberación de los circuitos y llamadas en toda la red por donde se transferirán los datos, y de la gestión de las conexiones. El protocolo de señalización es el Q.933, una extensión del Q.931 utilizada en la RDSI. En el nivel de enlace utiliza el protocolo LAF, que proporciona el control de error y de flujo del enlace de datos que permite el control completo de los mensajes de señalización.

2) **Plano de usuario.** Es el encargado de las operaciones, definiciones de servicios y protocolos para el intercambio de datos de usuario. Utiliza el protocolo LAF para la transferencia real de información entre los usuarios finales. El protocolo en el nivel de enlace sólo utiliza las funciones esenciales del protocolo LAF, el núcleo:


- Delimitación de tramas, alineación y transparencia de *flags*.
- Multiplexar y demultiplexar los circuitos virtuales utilizando el campo DLCI.
- Inspección de la trama para asegurar que está formada por un número entero de *bytes*.

LAF son las siglas de *link access protocol for frame mode services*.

- Comprobación de la longitud de la trama.
- Detección de errores con el campo CRC y problemas de formato.
- Control de congestión (particular del LAPF).

3) Corresponden a los servicios mínimos para no transmitir tramas entre usuarios que no proporcionan ni control de errores ni de flujo. Además, el usuario puede seleccionar funciones extremo a extremo en el nivel de enlace o de red (orden de las tramas, no duplicación de las tramas, probabilidad de pérdida, etc.).

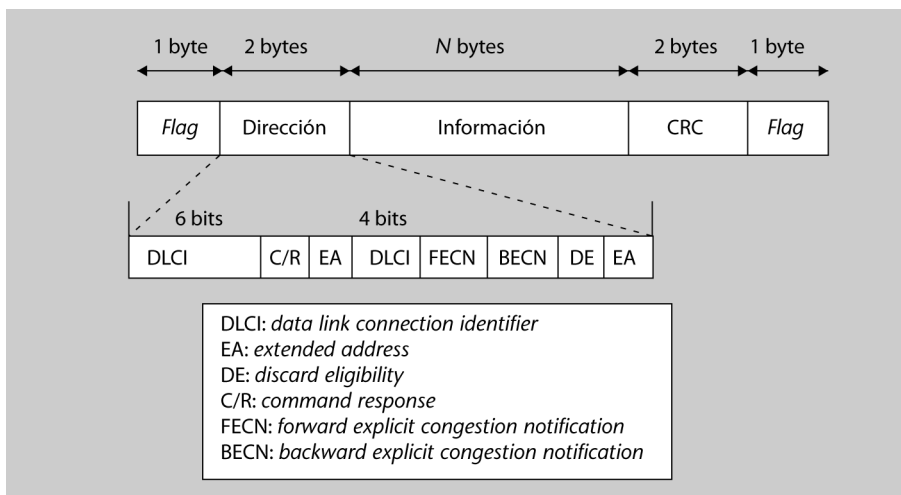
3.2.1. Protocolo LAPF

El FRL se desarrolló teniendo en cuenta que el medio de transmisión es fiable y más o menos libre de errores. Los errores se pueden detectar y recuperar desde el equipo de usuario. Por ello la estructura de trama no contiene campos para el control de flujo y el establecimiento de conexiones. 

3.2.2. Núcleo del LAPF

Para entender cómo funciona la transmisión de los datos en FRL observamos el formato de las tramas del núcleo del LAPF (*core protocol*) en la figura 27.

Figura 27. Formato de la trama LAPF



Dentro del campo *Dirección* de cada trama podemos destacar lo siguiente:

- **DLCI**: el identificador de conexión de enlace de datos que determina el enrutamiento (*routing*) dentro de la red, tanto si está prefijado en el caso de los PVC como si es asignado de forma dinámica en los SVC.
- **FECN**: bit que permite el control de congestión. Indica si existe congestión en la red en el sentido en el que viaja la trama.

- **BECN:** bit que indica si se da congestión en la red en el sentido opuesto al que viaja la trama.
- **DE:** permite marcar las tramas indicando si la trama se puede descartar en caso de congestión.

El formato es similar a otros protocolos de nivel 2 (SDLC, LAPD, LAPB, etc.), salvo en el hecho de que no tiene campo de control. Esto implica lo siguiente:

- Sólo existen tramas de información que transmiten datos. No se dan tramas de control.
- No existen tramas de señalización, ya que no se puede codificar mensajes especiales para establecer o liberar llamadas.
- No se puede realizar un control de errores ni de flujo, ya que las tramas no están ni numeradas.

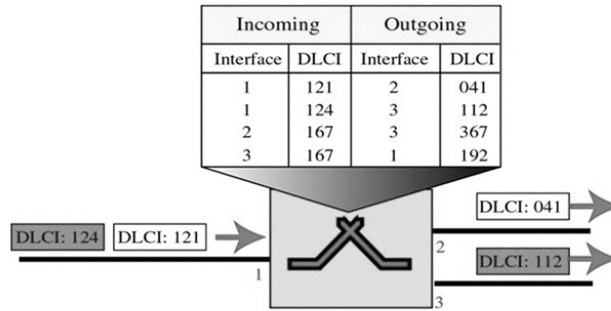
Estas funciones las implementarán los equipos terminales (direccionadores, puentes [*bridge*], controladores de comunicaciones), que han de disponer de mecanismos de secuenciación, control de flujo, envío de confirmaciones y detección y recuperación de las tramas duplicadas o erróneas con el fin de obtener íntegramente los datos enviados.

3.2.3. Identificador de conexión del enlace de datos (DLCI)

Este identificador no es una dirección de usuarios finales, sino que es una referencia que determina el camino en cada nodo, que va cambiándose durante todo el circuito virtual según unas tablas de encaminamiento. De esta manera no ha de contener la dirección entera con todo lo que comportaría. Con estos valores DLCI, cuando una trama llegue a una entrada, el conmutador traducirá el identificador de conexión y enviará la trama mediante la salida correspondiente. El identificador de conexión tiene 10 bits, igual que el número de circuito virtual en la capa de red, por lo que puede indicar hasta 1.024 valores, algunos de ellos reservados.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de cómo sería la tabla de encaminamiento de un conmutador Frame Relay. En este caso se ve una trama que llega con DLCI = 121 por el puerto 1 y, de acuerdo con la tabla de encaminamiento, es conmutada por el puerto 2 con DLCI = 041. De manera similar, una segunda trama llega por el puerto 1 con DLCI = 124 y, también según la tabla, es encaminada por el puerto 3 con DLCI = 112.

Figura 28. Tabla de conmutación en Frame Relay



3.2.4. Protocolo LAPF en el plano de control

Corresponde al protocolo LAPF completo. En este caso la trama incluye el campo de control, al igual que teníamos en el protocolo LAPD. Ello nos permitirá funciones de control de flujo y de errores extremo a extremo desde el plano de control. Con este campo podremos distinguir entre tramas de información, de supervisión y tramas no numeradas.

3.2.5. Control de flujo

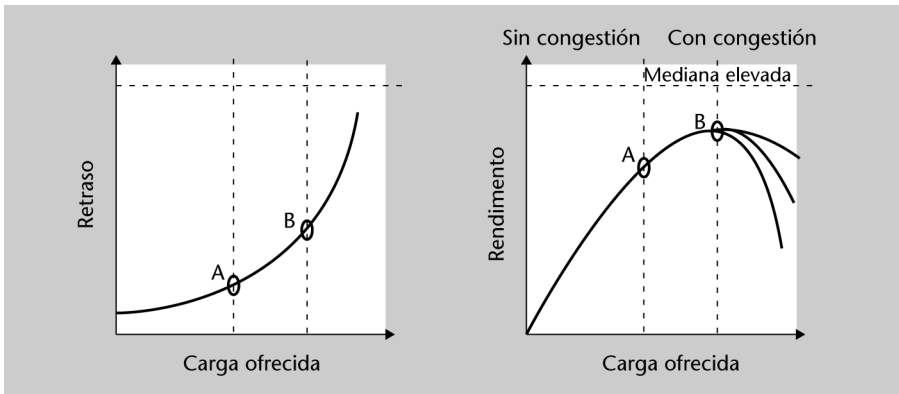
Como la red FRL no contiene ningún mecanismo de control de flujo, es preciso que lo realicen los equipos terminales a partir de la información que puedan extraer de la red. El punto clave en la gestión del tráfico se encuentra en el control de la congestión.

3.2.6. Congestión

Una región se congestiona a medida que la carga de la red aumenta, de forma que los retardos de cola en los nodos aumentan y provocan una disminución abrupta del rendimiento de la red y el crecimiento de las colas en los servidores de llamadas. Esta situación se debe intentar evitar.

El **control de congestión** es muy importante en una red FRL, vista la limitación de herramientas disponibles en los gestores de tramas, ya que normalmente se gestiona desde el nivel de red. El control es de total responsabilidad de la red y de los usuarios finales. La red permite detectar dónde existe congestión, y los usuarios han de poder controlarla limitando el flujo de tráfico. Cuando se da una congestión severa la red debe rechazar tramas.

Figura 29. Efectos de la congestión sobre el retardo y el rendimiento



El FRL utiliza dos mecanismos para controlar la congestión, por una parte la **gestión del tráfico** a partir de un conjunto de parámetros que permiten o bien marcar las tramas, o bien eliminarlas. El segundo mecanismo, por otra parte, es el **control de congestión** basado en la notificación a los usuarios de que se produce congestión a fin de que reduzcan el flujo de datos que envían.

3.2.7. Gestión del tráfico

La forma de rechazar tramas es utilizando el bit de elegibilidad DE incluido en el campo de dirección de la trama. El usuario pone el bit DE = 1 para indicar a la red que, en caso de problemas, esta trama es candidata para ser descartada.

CIR

CIR son las siglas de *committed information rate* o velocidad media de transmisión contratada.

Para aprovechar mejor los recursos, el FRL incluye el concepto de **tasa de información comprometida (CIR)** que viene a ser la velocidad media de transmisión, en bits/s, que la red se compromete a servir a un usuario para una determinada conexión.

Cualquier dato que se transmita a una velocidad superior a la CIR en un determinado intervalo de tiempo es susceptible de ser rechazado si se produce congestión; la red la puede marcar poniendo el bit DE = 1. El intervalo de tiempo en el que se mide el CIR se denomina ***T_c* (committed rate measurement interval)**, que es un parámetro que establece el proveedor de la red. De todas maneras, si el dato se transmite por debajo de la CIR tampoco tiene garantía de no ser rechazado en caso de congestión extrema.

La CIR se contrata para cada PVC en el momento de la conexión o se negocia dinámicamente en el caso de circuitos virtuales conmutados, y es el parámetro que permite fijar una tarifa al servicio.

Se definen otros parámetros adicionales:

- **Tamaño de ráfaga confirmado (B_C , *committed burst size*)**. Es la cantidad máxima de datos que se permite enviar a la red por parte del usuario en

condiciones normales, durante el intervalo de tiempo T_c . Estos datos pueden pertenecer a una trama o a más de una. El valor de B_C se fija durante el establecimiento de la llamada, o ya se tiene en los PVC. La relación con la CIR y el intervalo de medida es:

$$\text{CIR} = \frac{B_C}{T_C}$$

- **Tamaño de ráfaga en exceso (B_e , *excess burst size*)**. Es la cantidad de datos adicional que puede ser transmitida por encima de B_C , en condiciones normales, durante el intervalo de tiempo T_c . Podríamos decir que tiene una menor probabilidad de recepción que B_C .
- Un último parámetro que interviene en la gestión del tráfico es el **EIR (*excess information rate*)**, o velocidad máxima en exceso. Nos define cuál es la velocidad máxima disponible para el usuario. Habitualmente esta velocidad corresponde a la velocidad de acceso por parte del usuario, que se encuentra determinada por la calidad de la línea. Por lo tanto, cualquier dato que tenga una velocidad superior al valor EIR se descartará automáticamente.

$$\text{EIR} = \frac{B_C + B_e}{T_C}$$

Los parámetros que utiliza FRL para realizar la gestión del tráfico son los siguientes:

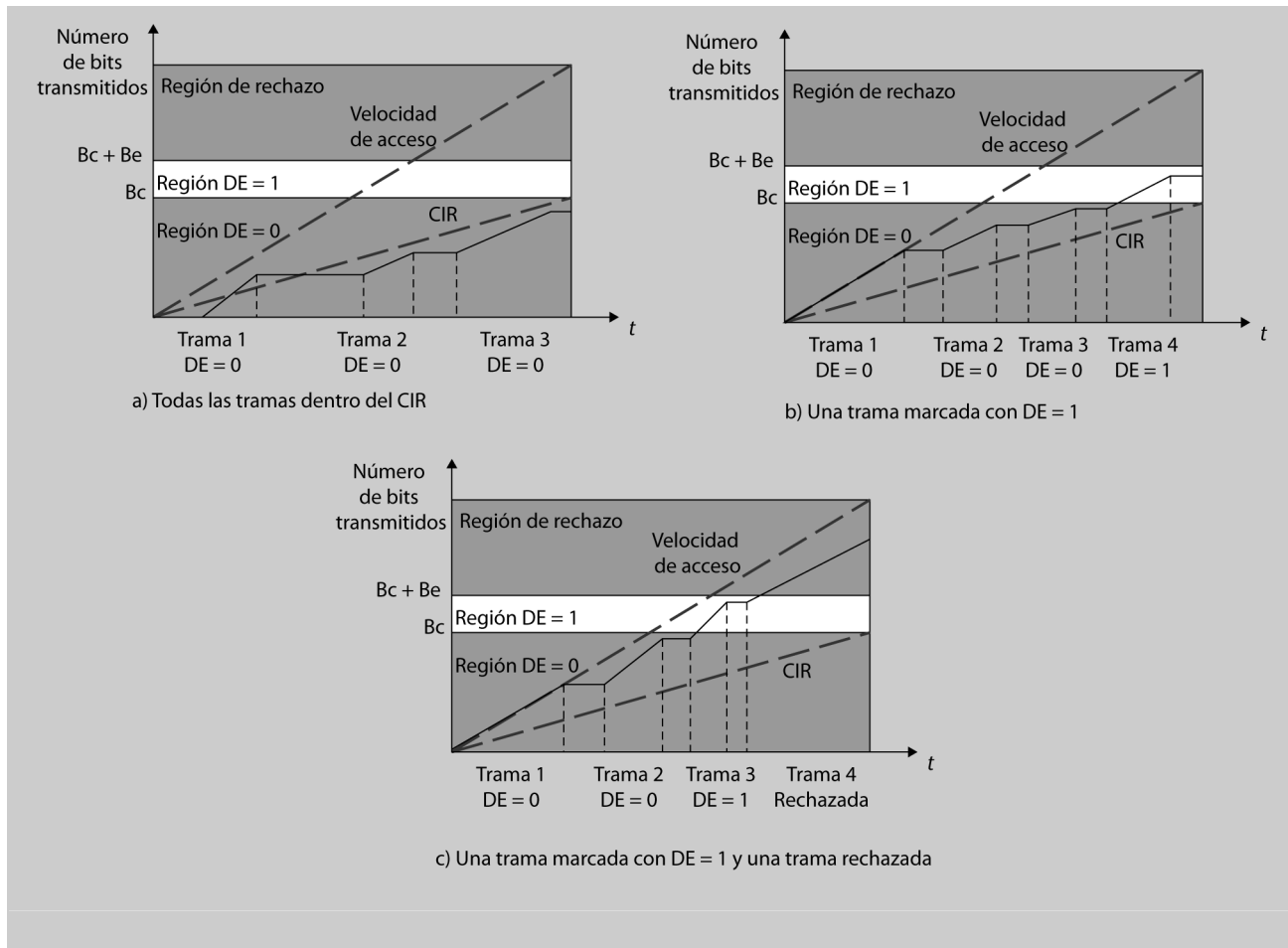
- CIR: *committed information rate*
- T_c : *committed rate measurement interval*
- B_C : *committed burst size*
- B_e : *excess burst size*
- EIR: *excess information rate*

Ejemplos de gestión del tráfico

Suponemos que un usuario transmite tramas a la velocidad máxima de transmisión. El volumen de información transmitida se va acumulando. Mientras el volumen se mantenga por debajo de B_C , las tramas enviadas serán aceptadas por la red.

Si continúa transmitiendo, llegará un momento en el que el volumen de información transmitida superará B_C . En este momento el bit DE de la trama será activado por el gestor de tramas y pasará a ser considerado de baja prioridad y, por lo tanto, potencialmente descartable. Si continúa transmitiendo, se puede llegar a superar el nivel $B_C + B_e$, a partir de este punto las tramas no serán aceptadas por la red y serán rechazadas. Una vez pasado el intervalo de tiempo T_c , se inicializarán los parámetros del tráfico acumulado y se volverá a ejecutar el algoritmo.

Figura 30. Ejemplos de gestión del tráfico



Supongamos que disponemos de una línea de acceso Frame Relay de 2 Mbps, con un CIR = 1 Mbps, un EIR = 384 kbps y un valor de $TC = 1$ segundo.

a) Calculad los valores de Bc y de Be .

$$Bc = CIR \cdot T = 1.024 \text{ kbits}$$

$$Be = 384 \text{ kbits}$$

b) Imaginemos ahora tres casos diferentes, que transmiten todos ellos tramas de 6.400 bytes.

- Caso 1: llega un flujo constante de 40 tramas/s.
- Caso 2: llega un flujo constante de 27,5 tramas/s.
- Caso 3: llega un flujo constante de 20 tramas/s.

Explicad en los tres casos cómo se tratarán las diferentes tramas.

Caso 1: llega un flujo constante de 40 tramas/s.

Las 40 tramas/s que envía el *host* se reparten de la manera siguiente:

- 20 tramas/s (1.024 kbps) son enviadas a la red porque no superan el valor Bc durante el tiempo T . El valor $DE = 0$.
- 7,5 tramas/s (384 kbps) se enviarán por la EIR, de forma que tendrán el bit $DE = 1$.
- 12,5 tramas/s son descartadas.

Caso 2: llega un flujo constante de 27,5 tramas/s.

Se consigue transmitir todo el caudal:

- 20 tramas/s con DE = 0
- 7,5 tramas/s con DE = 1

Caso 3: llega un flujo constante de 20 tramas/s. Todas serán enviadas sin marcar. Es decir, 20 tramas/s enviadas con DE = 0.

3.2.8. Control de congestión

Se dan dos formas de notificar a los usuarios y conmutadores que existe congestión y que deben intentar corregirla. Cuando en un conmutador se empiezan a experimentar problemas (colas llenas, problemas de gestión de memoria, etc.), éste informa a los dos nodos anterior y posterior utilizando los bits BECN y FECN del campo de dirección para poder controlar el flujo de tráfico. Cuando un usuario recibe una notificación de este tipo ha de reducir la velocidad de transmisión de datos.


4. Modo de transferencia asíncrona (ATM)

El modo de transferencia asíncrona (ATM) (*asynchronous transfer mode*) es una tecnología de conmutación y multiplexación de alta velocidad orientada a conexión. Se utiliza para aplicaciones de alta velocidad en telecomunicaciones, como son la transmisión de grandes volúmenes de datos, videoconferencia, televisión, multimedia, etc.

La tecnología ATM combina la simplicidad de la conmutación de circuitos con la flexibilidad de la conmutación por paquetes. Podríamos considerar que funciona con conmutación de paquetes y al mismo tiempo utiliza el modo circuito, ya que de esta manera, a la hora de transmitir audio y vídeo lo puede efectuar en tiempo real, sin retardos, y al mismo tiempo permite ofrecer servicios con una velocidad variable.

En el año 1988 la ITU-T definió la tecnología ATM, también denominada *cell relay*. Nació por la necesidad creciente de una tecnología que permitiera varios tipos de tráfico en diferentes distancias y a una gran variedad de velocidades con una gran calidad de servicio. Se llama modo asíncrono porque el acceso de los usuarios a la red se lleva a cabo en instantes determinados de tiempo, en canales específicos, pero sin ninguna reserva.

Con el fin de aumentar la velocidad de los canales síncronos de la RDSI, comprobaron que el modo de transmisión síncrona (STM, *synchronous transfer mode*), que se define en la RDSI, no era el adecuado, ya que asigna un canal fijo durante todo el tiempo que dura la comunicación independientemente de la cantidad de información enviada por el canal. Con un modelo síncrono se desperdicia mucha anchura de banda; en cambio, un modelo asíncrono se adapta mejor a un tráfico cada vez más aleatorio en velocidad y duración.

Al mismo tiempo se adoptó como estándar de transmisión SDH (*synchronous digital hierarchy*), que permite maximizar la anchura de banda disponible adaptando las velocidades entre los enlaces ópticos de la red. 

La ITU-T definió la unidad de transmisión de información ATM, **celda**, con una longitud constante de 48 *bytes* y 5 *bytes* de cabecera. Al mismo tiempo definió que ATM junto con SDH serían las dos principales tecnologías que utilizaría la RDSI de banda ancha.

La celda de 53 *bytes* es la unidad de transmisión de ATM.

Las principales características de ATM son las siguientes: !

- Anchura de banda flexible y escalable, y altas velocidades de transferencia. Utiliza multiplexación estadística y conmutación de paquetes (celdas), de longitud fija de 53 *bytes*.
- Tecnología conmutada y orientada a conexión. El modo de operación es mediante circuitos virtuales.
- Minimiza el procesamiento de las celdas dentro de la red.
- Más disponibilidad de la red. Los conmutadores ATM son muy rápidos porque la conmutación se efectúa con dispositivos físicos (hardware) y no mediante programas (software). El procesamiento y retardo en cada conmutador es mínimo, por lo cual aumenta la velocidad de transferencia.

La XDSI de banda ancha utiliza ATM + SDH.

4.1. Configuración y modelo de referencia de la ATM

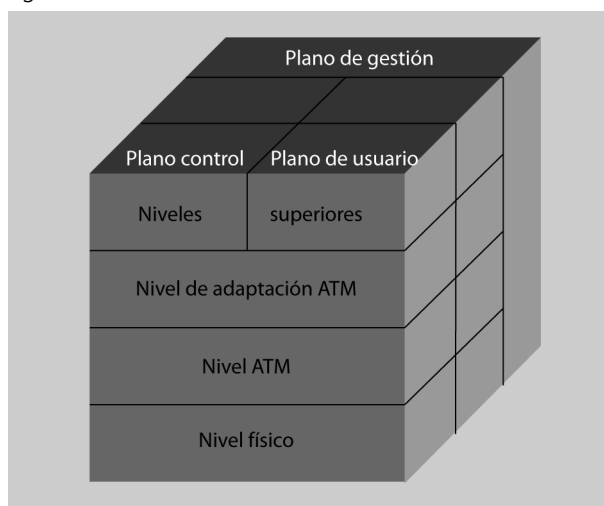
Para definir la configuración de referencia de la interfaz UNI de la RDSI-BA, que permite la conexión del usuario a la red ATM, la ITU-T utilizó los mismos grupos funcionales de la RDSI con algunas pequeñas diferencias. Con respecto a los puntos de referencia, son los mismos con el subíndice B; sin embargo, destacamos que el punto de referencia R_B puede no tener facilidades de banda ancha.

Para cada conexión, en los puntos de referencia S_B y T_B se puede acceder a un conjunto de servicios con diferentes velocidades de acceso: variable (VBR), constante (CBR) o disponible (ABR), y a diferentes cualidades de servicio (QoS) en términos de velocidad y retardo.

Existen tres nuevas velocidades de transmisión:

- 51,84 Mbits/s (SONET STS-1)
- 155,52 Mbits/s (SONET STS-3 y SDH STM-1)
- 622,08 Mbits/s (SONET STS-12 y SDH STM-4)

Figura 31. Modelo de referencia ATM



El **modelo de referencia** nos muestra la arquitectura de protocolos ATM. Tal como se puede comprobar, consta de tres niveles y de tres planos. El componente esencial es el **nivel ATM**, que es común a todos los servicios y medios físicos utilizados. Su función es establecer mecanismos de control básicos para la transferencia de celdas, como son la conmutación y la multiplexación de las celdas. Se complementa con el **nivel de adaptación ATM, AAL** (*ATM adaptation layer*), que tiene el objetivo de proporcionar la funcionalidad necesaria para los diferentes servicios soportados, adapta la información de los niveles superiores al formato de celdas ATM. El **nivel físico PL** (*physical layer*) ajusta la información a los medios físicos y estructuras de transporte.

Se definen tres planos:

- **Plano de usuario.** Permite transmitir la información de usuario y el control asociado (de flujo, de errores).
- **Plano de control.** Se encarga de la señalización de control de las llamadas y de la conexión. Por lo tanto, del establecimiento, control y liberación de las conexiones.
- **Plano de gestión.** Se ocupa de la gestión y mantenimiento del sistema, tanto de los niveles (funciones relativas a recursos y parámetros de cada nivel) como de los planos (funciones relativas al sistema y al conjunto de los planos). No presenta estructura de niveles.

	Funciones de niveles superiores	Niveles superiores	
Gestión de niveles	Convergencia	CS	AAL
	Segmentación y reensamblaje	SAR	
	Control genérico de flujo Generación/extracción de la cabecera de la celda Traducción VPI/VCI de la celda Multiplexación/desmultiplexación de celdas	ATM	
	Desacoplamiento de la velocidad de las celdas Generación/verificación del campo de control de la cabecera Alineación de celdas Adaptación de tramas de transmisión Generación/recuperación de tramas de transmisión	TC	Nivel físico
	Temporización de bit Medio físico	PM	

4.2. Nivel físico. Estructura SDH

El nivel físico genera un flujo continuado de celdas ATM que se transmite de forma síncrona a través del medio. Sin embargo, también lleva a cabo otras funciones:

- Delimitación de las celdas.
- Transmisión de información de sincronismo.

- Control de los errores en la transmisión.
- Adaptación al medio físico.

4.2.1. Estructura de protocolos

La estructura del nivel físico de la ATM se divide en dos subniveles:

- **Medio físico (PM).** Únicamente realiza funciones dependientes del medio. Encargado de la transmisión/recepción de bits por el medio físico con información de temporización para el sincronismo.
- **Convergencia de la transmisión (TC).** Encargado de generar y recuperar las tramas de transmisión, adaptar la velocidad de las celdas ATM, insertando o suprimiendo celdas, a la capacidad de transmisión y crear el flujo de datos para ser transmitido en el medio físico. En el destino debe extraer las celdas del flujo de datos recibidos, comprobar que son correctas y entregarlas al nivel superior ATM. Las celdas vacías o erróneas se rechazan.

4.2.2. Estructuras de transmisión. Jerarquía digital síncrona

Habitualmente, con el fin de transportar la información a altas velocidades, se utiliza la técnica basada en tramas síncronas en las que las celdas se agrupan en una trama síncrona denominada STM definida en la jerarquía digital síncrona (SDH o SONET).

En 1986, la ITU-T estableció un conjunto de recomendaciones que definen la jerarquía digital síncrona. Consiste en un conjunto de estructuras de datos jerárquicos que multiplexan la información de los usuarios por toda la red mediante enlaces ópticos. La SDH estuvo motivada por la aparición del SONET, que es un estándar desarrollado en Estados Unidos con el fin de obtener el máximo provecho a la transmisión digital por medios ópticos y que adoptó ANSI. Del SONET podemos destacar la capacidad de transportar múltiples datos multiplexados, proporcionando unos campos de cabeceras (*overhead*) muy eficientes en la gestión de redes de alta velocidad.

SONET

SONET son las siglas de *synchronous optical network*, el estándar de transmisión síncrona utilizado en EE.UU.

Los motivos del desarrollo del estándar SDH son los siguientes 

- Son necesarios métodos de multiplexación de los sistemas de transmisión ópticos. Los modelos europeo y americano divergen, y existen criterios propios por parte de los fabricantes. Se deben compatibilizar los diferentes equipos.
- Se compensan las diferentes velocidades de reloj de varios canales añadiendo bits de relleno; esto no permite identificar y extraer canales en puntos intermedios de la transmisión. Por lo tanto, tienen poca flexibilidad.

- La multiplexación es asíncrona, por lo que se precisan diferentes relojes.
- Cada orden jerárquica posee tramas diferentes.
- Los sistemas de transmisión disponen de pocos elementos para el control y gestión de la red. Es necesario un apoyo para futuras demandas de alta velocidad como en la RDSI-BA.

Las técnicas que existen de multiplexación plesiócrona (PDH) obligan a convertir todo el tráfico en bits de la misma dimensión, aunque hayan sido generados por diferentes relojes, antes de ser multiplexados por los enlaces de alta velocidad. Por ello es preciso añadir bits (tributarios) para poder completar tramas y así adaptar las diferentes fuentes de tráfico.

Con SDH no son necesarios tantos procesos de multiplexación/desmultiplexación porque todas las señales están sincronizadas a la misma frecuencia. Los sistemas SDH ofrecen una capacidad de extracción/inserción estándar que se puede aplicar a todos los niveles de la jerarquía. Se utilizan unos apuntadores que localizan el canal dentro de la estructura, de forma que podemos extraer, poner o simplemente localizar la información ajustando unos apuntadores. Ello permite extraer señales de las tramas de forma dinámica con un solo multiplexor.

Las principales ventajas de la SDH con respecto a los sistemas utilizados anteriormente son las siguientes:

- Procedimiento simplificado para multiplexar/desmultiplexar.
- Permiten redes con topología en anillo mediante los equipos multiplexores denominados *add-drop*.
- El sincronismo es único en toda la red.
- Permiten transportar las señales síncronas y, además, las asíncronas multiplexadas con la jerarquía (PDH).
- En las tramas llevan consigo información para el control, gestión, etc. para toda la red, y todavía les sobra capacidad para aplicaciones futuras.
- Permite transportar señales de banda ancha como ATM, *dual queue dual bus* (DQDB) y *fiber distributed data interface* (FDDI), entre otras.
- Se pueden utilizar en cualquier tipo de redes, urbanas en anillo o interurbanas de largo recorrido.

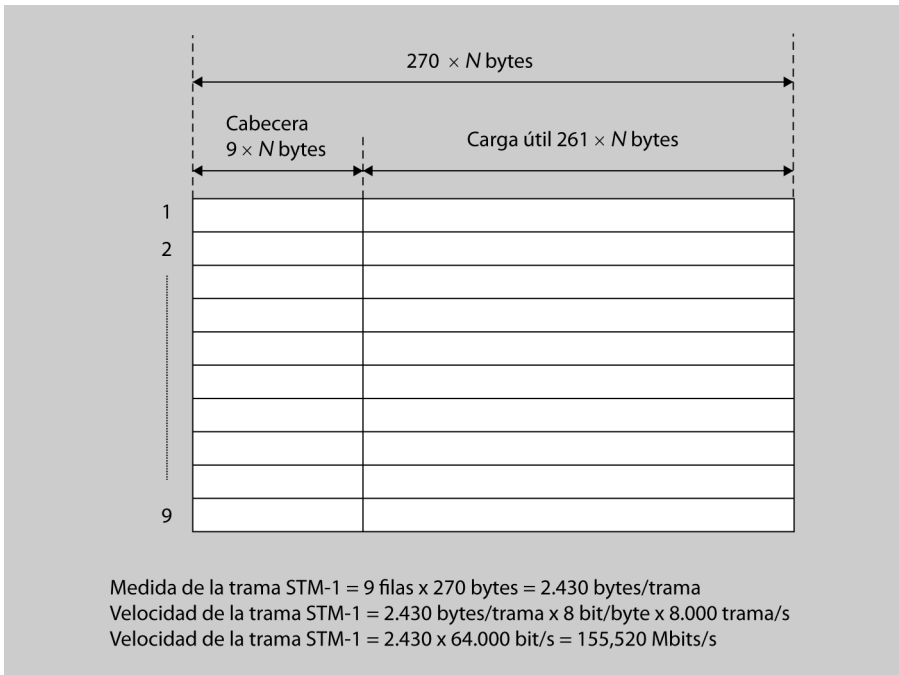
SDH permite sincronismo único en toda la red y facilita la multiplexación y desmultiplexación de las señales.

4.2.3. Estructura de la trama SDH

La estructura SDH se basa en la trama **STM-1** (*synchronous transport module nivel 1*).

STM-1 es el módulo básico de transporte síncrono SDH con velocidad 155,52 Mbits/s.

Figura 32. Estructura de la trama STM-N



Cada trama STM-N está formada por dos secciones diferenciadas: sección de cabecera (*section overhead*, SOH) y la carga útil (*payload*). La longitud de una sección lineal es de $270 \times N \text{ bytes}$, de los cuales $9 \times N \text{ bytes}$ corresponden a la SOH y $261 \times N \text{ bytes}$ a la carga útil. Este esquema lineal se repite hasta nueve veces, por lo cual la trama la representaremos en dos dimensiones.

Ejemplo

Calcularemos la velocidad a la que deberá viajar cada módulo STM-N. La duración de las tramas de la jerarquía digital síncrona es de $125 \mu\text{s}$, que corresponde a una velocidad de 8 tramas/s; de aquí surge la velocidad de 64 kbit/s. Por lo tanto, la velocidad de una trama STM-N = $9 \times 270 N \text{ kbit/s} = 155.520 \times N \text{ kbit/s}$. Para $N = 1$ corresponde una velocidad STM-1 = 155,52 Mbits/s, tal como habíamos indicado.

Cuatro módulos STM-1 forman un STM-4 a 622,08 Mbits/s y 16 forman el STM-16 a 2.488,32 Mbits/s, y así sucesivamente, tal y como indica la tabla por valores 1, 4, 16 y 64. La velocidad de 51,84 Mbits/s deriva de la estructura STS-1 de la norma SONET.

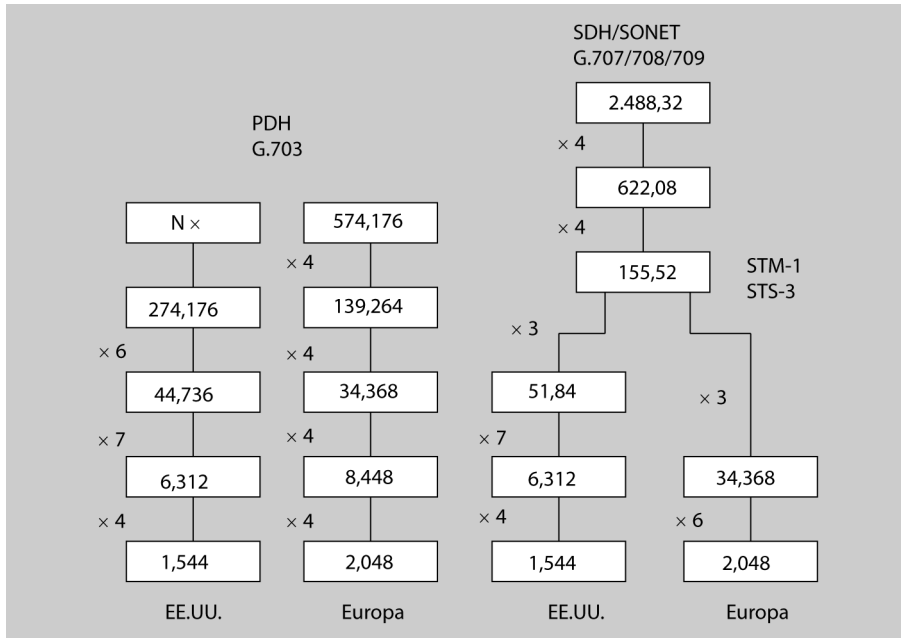
Denominación SDH	Denominación SONET	Velocidad	N.º de canales
STM-1	STS-3	155,52 Mbits/s	1.890
STM-4	STS-12	622,06 Mbits/s	7.560
STM-16	STS-48	2.488,32 Mbits/s	30.240
STM-64	STS-192	9.953,28 Mbits/s	120.960

STS-1
 STS-1 son las siglas de *synchronous transport signal level 1*, que es el módulo básico de la norma SONET.

Podemos ver las velocidades definidas en cada jerarquía y sus equivalencias entre SONET y SDH. El SDH se inicia a una velocidad de 155,52 Mbits/s en Europa, que es el triple que la de 51,84 Mbits/s de Estados Unidos y Japón. A partir de esta velocidad correspondiente al primer nivel jerárquico, obten-

dremos velocidades múltiples de ésta en los niveles superiores. Además, las velocidades de la PDH entre 1,544 Mb/s y 139,264 Mb/s pueden transportarse dentro del SDH en la trama STM-1 para poder cambiar de jerarquía sin problemas. Gracias a esta característica el SDH tiene aceptación.

Figura 33. Esquema de las jerarquías de multiplexación (valores expresados en Mb/s)



A cada nivel de multiplexación se puede asignar una capacidad de carga definida como la cantidad de información que cada nivel de multiplexación puede transportar en un módulo de transporte. Por ello se definen los **contenedores virtuales (VC, virtual container)**, que son simplemente la parte de la trama que permite llevar información, que corresponde a la carga útil de la trama (celdas ATM, canales PDH, etc.).

Los contenedores virtuales pueden tener diferentes medidas según el valor de N. Cada uno de ellos corresponde a una velocidad binaria plesiócrona existente. Por ejemplo, el VC-4 consta de 2.340 bytes con una capacidad de transporte de 149,76 Mb/s que permite transportar una señal a 139,264 Mb/s, el VC-12 para señales de 2,048 Mb/s y el VC-11 para 1,544 Mb/s, etc.

Designación	Velocidad de multiplexación PDH
VC-11	1,544 Mb/s
VC-12	2,048 Mb/s
VC-2	6,048 Mb/s
VC-3	34,368 y 44,736 Mb/s
VC-4	139,264 Mb/s

La SDH permite una utilización más eficaz, flexible y económica del ancho de banda disponible, de forma que la podemos asignar dinámicamente a cualquier nodo. Ello permite crear redes en anillo.

SONET y SDH, tal y como hemos visto, son totalmente compatibles aunque presentan algunas diferencias. SONET, aparte de que utiliza nomenclaturas diferentes para las tramas, define muchos más niveles jerárquicos que SDH.

4.3. Nivel ATM. Celdas

Este nivel es la base de la tecnología del *cell relay*. Su misión es manipular las celdas. No realiza control de flujo ni de errores. Sus funciones son las siguientes:

- Multiplexación/desmultiplexación de celdas: se multiplexan celdas de diferentes canales virtuales (VC) y trayectos virtuales (VP) en una única corriente de celdas. En la recepción el proceso es inverso.
- Construcción/extracción de cabeceras: se genera la cabecera de la celda una vez recibida la información de la capa superior (AAL), excepto el control de errores, que lo realiza en el nivel físico. En la recepción se efectúa el proceso de extracción de la cabecera.
- Encaminamiento entre los nodos: en los nodos intermedios se realiza una función de encaminamiento utilizando los campos de identificador de trayecto virtual (VPI) e identificador de canal virtual (VCI). Las etiquetas VPI y VCI tienen validez local y es preciso cambiarlas en los nodos de conmutación según una función de translación.

4.3.1. Formato de la celda

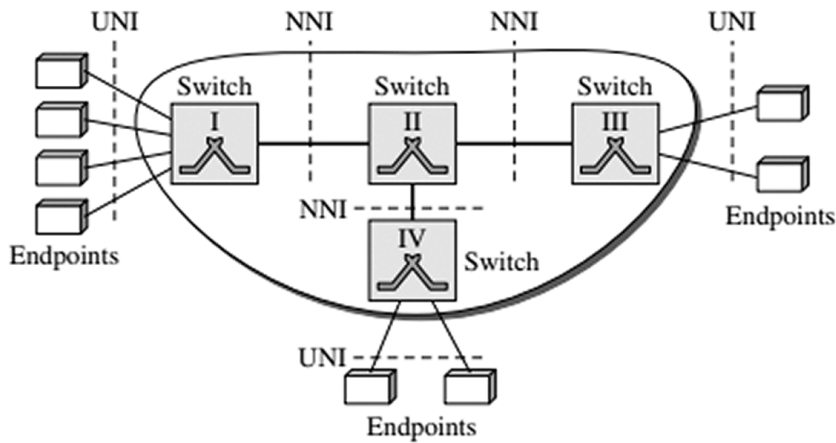
La tecnología ATM se basa en una celda básica de 53 *bytes* dividida en dos bloques: una cabecera (*header*) de 5 *bytes* que lleva consigo información de encaminamiento y el bloque de información (*payload*) de 48 *bytes*, donde se transmiten los datos del usuario y protocolos del nivel de adaptación AAL. La utilización de celdas pequeñas reduce el retardo y por el hecho de ser de dimensiones fijas se conmutan más fácilmente.

La ITU-T especifica dos formatos de celdas con diferente cabecera según la interfaz que se utilice. Los formatos se denominan:

- UNI (*user to network interface*).
- NNI (*network to network interface*).

En la figura siguiente se muestra cómo los puntos finales se conectan a la red ATM mediante la interfaz UNI, mientras que los conmutadores se conectan entre ellos mediante las interfaces NNI.

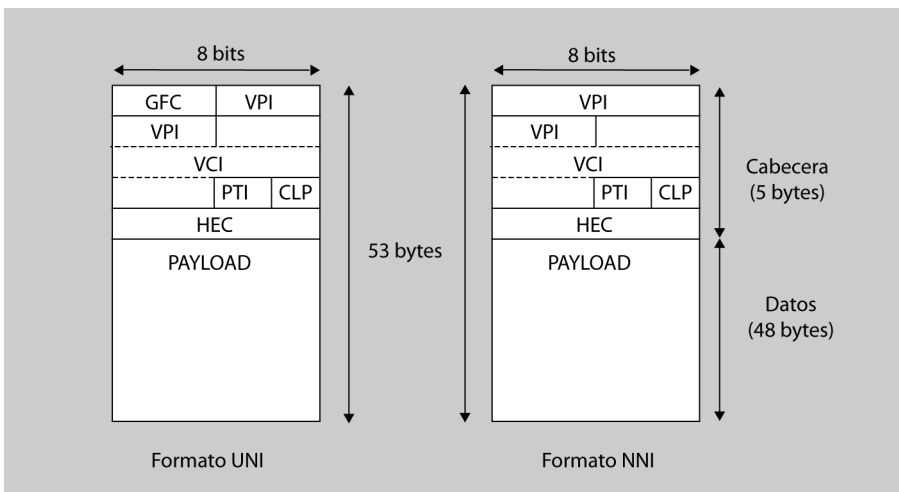
Figura 34. Arquitectura de red ATM



Los campos que forman la cabecera son:

- **GFC** (*generic flow control*): controla el flujo y el acceso físico a cualquier tipo de estructura UNI (anillo, estrella, bus).
- **VPI** (*virtual path identifier*): identificador del camino virtual. Es un campo para el encaminamiento de la celda por la red.
- **VCI** (*virtual channel identifier*): identificador del canal virtual para encaminar la celda.
- **PTI** (*payload type identifier*): está formado por 3 bits e identifica el tipo de carga útil.
- **CLP** (*cell loss priority*): indica a la red cuándo una celda tiene prioridad, 0: alta prioridad y 1: puede ser descartada en caso de congestión.
- **HEC** (*header error control*): es un *byte* que controla los errores de la cabecera.

Figura 35. Formato de los dos tipos de celdas ATM



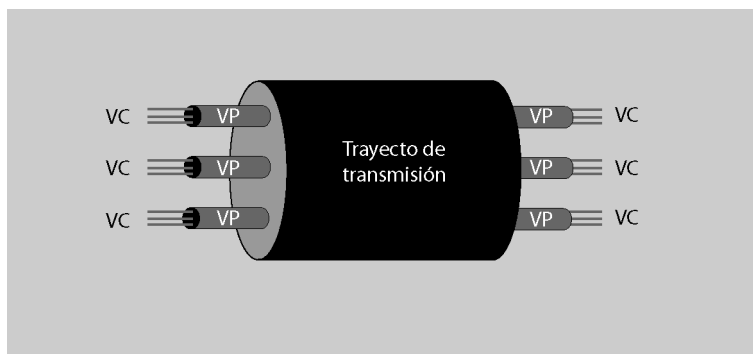
4.3.2. Multiplexación ATM

Los campos VCI y VPI nos determinan el circuito virtual al que pertenece una determinada celda. Este camino se fija al inicio de la conexión y una vez establecida lo utilizarán todas las celdas de una determinada comunicación. Estos identificadores no son locales y varían cada vez que atraviesan un conmutador. A diferencia de lo que pasaba en *frame relay*, en ATM distinguimos dos niveles: !

- El **canal virtual** (VC, *virtual channel*) nos identifica una conexión lógica unidireccional para la transferencia de información en ATM.
- El **trayecto virtual** (VP, *virtual path*) es un haz de canales virtuales con los mismos extremos. Simplifican la estructura de la red, mejoran el funcionamiento y seguridad de la red, reduciendo el procesamiento y acortando los tiempos de establecimiento.

En ATM distinguimos dos niveles de multiplexación: canal virtual (VC) y trayecto virtual (VP).

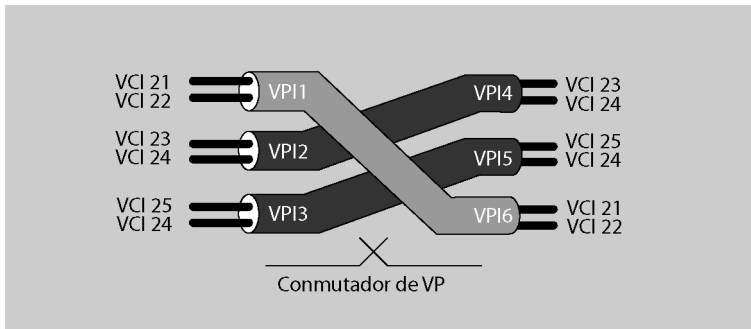
Figura 36. Representación de los dos niveles de multiplexación ATM



La conmutación en ATM también es diferente en los dos niveles:

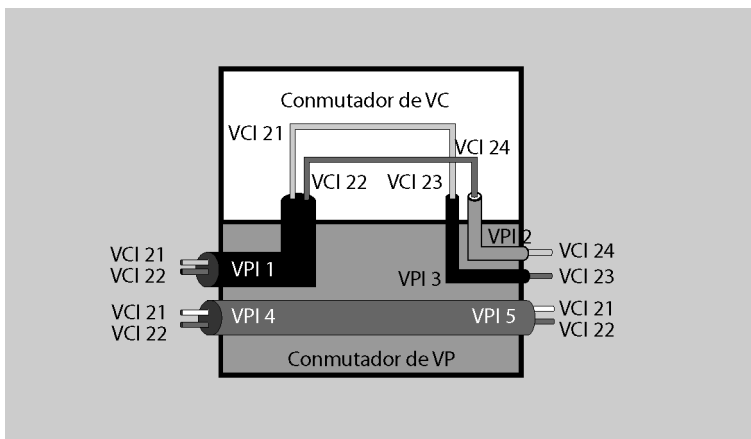
- **Conmutador de trayectos virtuales.** Se realiza a partir del valor del identificador VPI que transportan las celdas en la cabecera. El sistema es análogo al caso del *frame relay*. Este conmutador sólo conmuta trayectos virtuales; por lo tanto, cambia el VPI del trayecto virtual entrante por otro, en función de la salida que debe tomar, a partir de unas tablas de conmutación que posee cada nodo. No modifica los valores de los VCI, tal y como se puede observar en la figura 37.

Figura 37. Esquema de conmutación de trayectos virtuales



- **Conmutador de canales virtuales.** En los conmutadores de canales virtuales finalizan enlaces de VC, por lo tanto, también de VP. En este caso, es necesario que el conmutador realice una traducción de los VCI y de los VPI para cada conexión.

Figura 38. Esquema de conmutación de los canales virtuales



Las redes ATM distinguen dos tipos de circuitos, en función de la naturaleza de su establecimiento: los circuitos virtuales permanentes y los conmutados.

4.4. Nivel de adaptación ATM (AAL)

El nivel de adaptación es el responsable de las relaciones con el mundo externo, por ello sólo se encuentra en los nodos terminales de la red, que son los que proporcionan los puntos de acceso a los usuarios finales. Los datos a nivel ATM se hallan estructurados en celdas que son demasiado pequeñas para las necesidades que tienen los usuarios; su función es la de adaptar la información que le llega al formato ATM. Las principales funciones son las siguientes:

- Segmenta/reensambla los datos en celdas para poder transmitir en formato ATM.
- Recupera errores.
- Mantiene el sincronismo entre terminales.

4.4.1. Estructura del nivel AAL

El nivel AAL está organizado en dos subniveles:

- **Subnivel de convergencia (CS).** Realiza funciones específicas para cada aplicación, como son la detección y multiplexaje de datos, control de errores y mantenimiento del sincronismo. Este subnivel, a la vez, está organizado en dos subniveles más:
 - **Subnivel de convergencia de servicios específicos (SSCS).**
 - **Subnivel de parte común (CPS).**
- **Subnivel de segmentación y reensamblaje (SAR).** Segmenta la información del nivel superior (CS) para construir las celdas de 48 *bytes* y enviarlas al nivel ATM con el fin de que los ponga en cabecera. Reconstruye o desempaqueta la información original al recibir los contenidos de una secuencia de celdas.

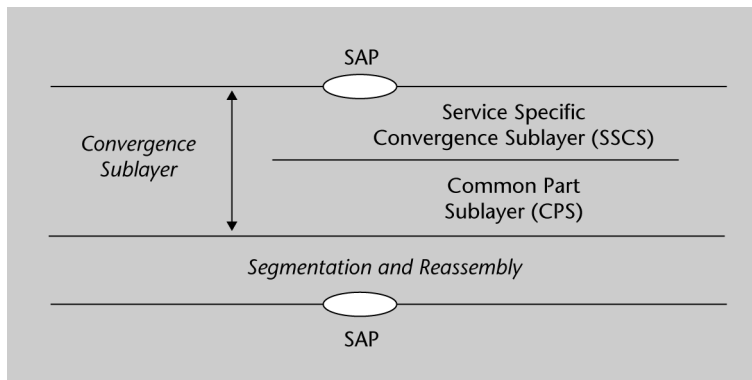
CS es la sigla de *convergence sublayer*.

SSCS es la sigla de *service-specific convergence sublayer*.

CPS es la sigla de *common part sublayer*.

SAR es la sigla de *segmentation and reassembly*.

Figura 39. Subniveles de adaptación ATM



En la figura se puede ver cómo queda la estructura completa de nivel y su interacción tanto con el nivel superior como con la capa ATM por medio de los puntos de acceso al servicio (SAP).

1) Nivel de adaptación AAL1

Como se ha dicho, el AAL1 está diseñado para audio de alta calidad o incluso para vídeo con tasa de bits constante.

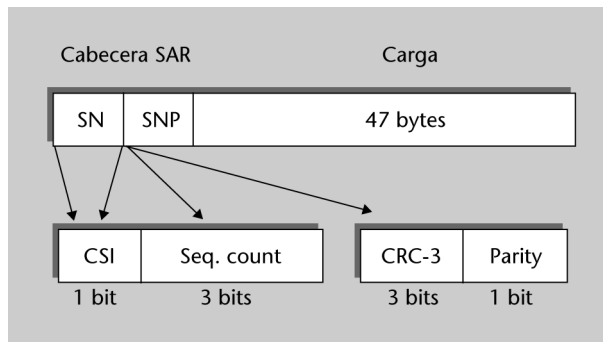
Proporciona transferencia de datos con tasa de bits constante y hace la entrega a la misma tasa de bits. Proporciona transferencia de información de variaciones de retardo entre las aplicaciones emisor y receptor, y puede gestionar tanto las variaciones del retardo como detectar pérdida de celdas.

El AAL1 está organizado en los subniveles SAR y CS.

a) El **subnivel SAR** es el responsable del transporte y detección de errores en bit. Acepta bloques de 47 bytes de CS y añade una cabecera de 1 byte para for-

mar lo que se llama SAR-PDU. A la vez, se pasa al nivel ATM donde se añaden los 5 bytes de la cabecera ATM.

Figura 40. Encapsulado SAR para AAL1



En la figura se ve el encapsulado de SAR-PDU. La cabecera está formada por dos campos de cuatro bits cada uno:

- **Número de secuencia (SN).**
- **Protección de número de secuencia (SNP).**

b) El **subnivel CS** realiza diversas tareas entre las que destacan la gestión de la variación del retardo entre celdas, procesamiento del contador de secuencia, procesamiento del FEC o monitorización del rendimiento.

Para que AAL1 pueda soportar aplicaciones con tasa constante, tiene que entregar los flujos de datos a la aplicación receptora con la misma tasa de bits que fueron transmitidos. Puede ocurrir que los conmutadores intermedios provoquen ciertos retardos. Para compensar estas variaciones en la llegada de las celdas, CS escribe las SAR-PDU, que llegan en una cola (*buffer*) que compensa las variaciones. Desde esta cola son entregadas con tasa constante a la aplicación AAL receptora.

2) Nivel de adaptación AAL2

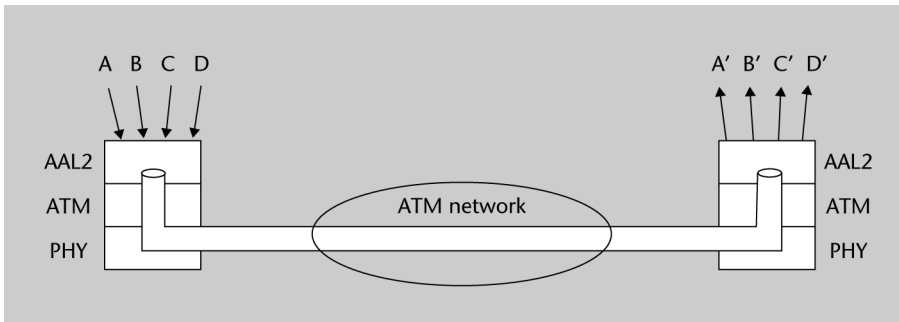
Este nivel de adaptación proporciona un transporte eficiente sobre ATM para múltiples aplicaciones que sean sensibles y tengan una tasa de bits con poca variación (voz, fax...). El AAL2 está pensado básicamente para la transmisión de vídeo, y en ciertos entornos se usa en la telefonía celular. El AAL2 se diseñó para multiplexar diversos flujos con tasa de bits variable en una única conexión ATM. En el extremo receptor se desmultiplexan y se separan en flujos individuales.

SN es la sigla de *sequence number*.

SNP es la sigla de *sequence number protection*.

FEC es la sigla de *forward error correction*.

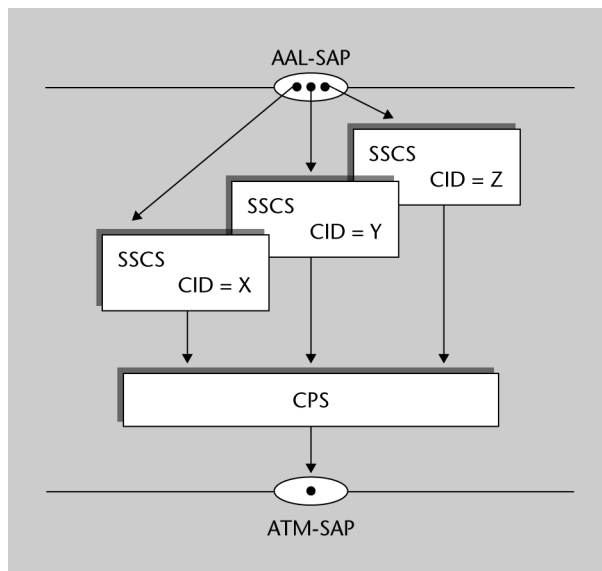
Figura 41. El AAL2 puede multiplexar diversos flujos de datos



El CS, que proporciona los servicios AAL2, está a la vez subdividido en el SSCS y el CPS. No hay nivel SAR en el AAL2. La multiplexación de los diferentes flujos de datos se consigue asociando a cada uno de los usuarios con un SSCS diferente. Se pueden definir diferentes protocolos SSCS para soportar diferentes tipos de servicios. Cada SSCS recibe datos desde su usuario y los pasa al CPS en forma de paquetes cortos.

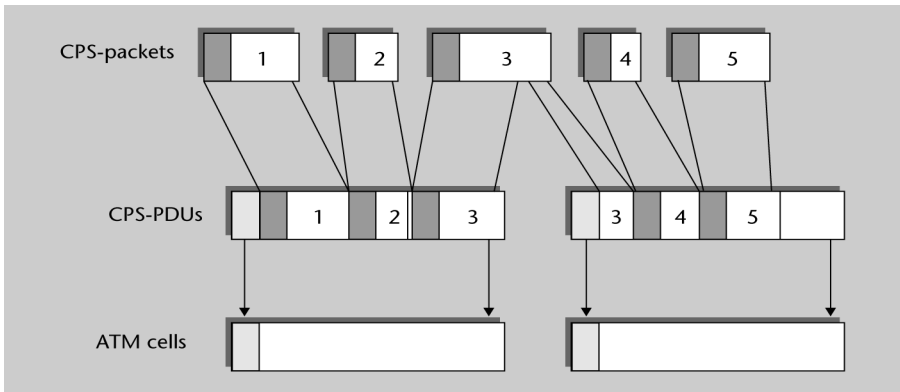
El CPS proporciona una función de multiplexado mediante la cual los paquetes recibidos desde los diferentes SSCS se multiplexan en una única conexión ATM. En la parte del receptor de la conexión ATM, los paquetes son obtenidos desde las celdas de entrada ATM por el CPS y entregados a los SSCS receptores correspondientes.

Figura 42. Modelo funcional de AAL2



Las aplicaciones que usan AAL2 normalmente trabajan con paquetes de longitud pequeña y además longitud variable. Cada paquete CPS es encapsulado, y entonces se empaqueta en un CPS-PDU. Como ya hemos dicho, el AAL2 está diseñado para multiplexar diversos flujos SSCS en una única conexión ATM. Esto se consigue empaquetando diversos paquetes CPS en una única CPS-PDU, donde cada paquete CPS pertenece a un flujo SSCS diferente. Incluso un paquete CPS puede estar troceado y formar parte de dos CPS-PDU sucesivos.

Figura 43. Empaquetado de los paquetes CPS en CPS-PDU



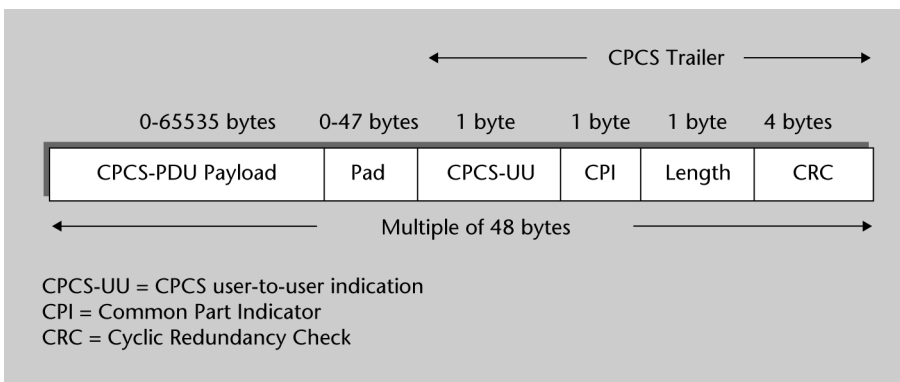
3) Nivel de adaptación AAL5

El nivel de adaptación AAL5 se usa para transferencias de datos. Debido a su simplicidad, es la capa de adaptación más popular. Los servicios AAL5 son proporcionados por los subniveles CS y SAR. A la vez, el CS está subdividido en SSCP y CPS.

El CPS proporciona una transferencia de datos de usuario no asegurada, y la longitud del paquete puede variar de 1 byte a 65.535 bytes. En el extremo remoto, el CPS puede detectar los errores e indicarlo a la aplicación de nivel superior. En caso de retransmisión, tiene que ser el protocolo de esta aplicación el que lo haga. Por ejemplo, podría ser TCP.

En la siguiente figura se muestra cómo queda encapsulada por el CPS la PDU de usuario.

Figura 44. Encapsulamiento CPS



Los campos definidos son los siguientes:

- **Relleno (Pad, padding).** Puede variar de 0 a 48 bytes de longitud. Se añade para asegurar que toda la CPS-PDU tiene un valor entero múltiplo de 48 bytes.
- **Indicador CPS usuario a usuario (CPS-UU).** Campo de 1 byte para transferir de forma transparente información CPS de usuario a usuario.
- **Indicador de parte común (CPI).** Campo de 1 byte pensado para futuras aplicaciones AAL5.

CPS-UU es la sigla de *CPS user-to-user indication*.

CPI es la sigla de *common part indicator*.

- **Longitud** (*length*). Campo de 2 bytes que indica la longitud en bytes de la carga (PDU de usuario).
- **CRC-32**.

Ejercicio

Una empresa dispone de un acceso ATM que usa para transmitir el tráfico telefónico y para acceder a un servidor remoto.

- Indicad razonadamente en función del tipo de tráfico qué tipo de nivel de adaptación (AAL) corresponde a cada uno de los dos servicios.
- Buscad cómo debe ser el formato de las unidades de datos de protocolo (PDU) en el subnivel de segmentación y reensamblaje (SAR) de los niveles de adaptación indicados en el apartado anterior.
- Para el servicio telefónico, suponiendo que se atienden de media un número de 100 conexiones telefónicas a 64 kbps simultáneamente, calculad la velocidad media sostenida (SCR) en bps y en celdas/s. Indicad para este caso qué relación existe entre la velocidad media (SCR) y la velocidad máxima (PCR).

Solución:

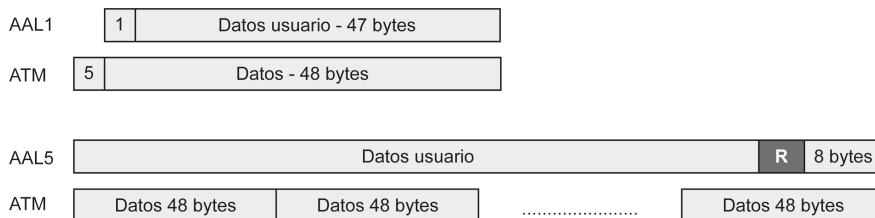
- El tipo de nivel de adaptación para cada uno de los dos servicios será:

Tráfico telefónico: clase A orientado a conexión, velocidad constante → AAL1

Acceso a servidor remoto: clase D no orientado a conexión, no restricción temporal → AAL5

- El formato de las unidades de datos de protocolo (PDU) en el subnivel de segmentación y reensamblaje (SAR) de los niveles de adaptación para AAL1 y AAL5:

PDU para AAL1 y AAL5



- Velocidad media sostenida (SCR) en bps y en celdas/s:

Velocidad constante: SCR = PCR.

1 canal de voz a 64 kbps tiene 47 bytes, pero necesita 53 bytes (47 bytes más 5 bytes de cabecera).

$$SCR = 64000 \text{ bps} \cdot \frac{1 \text{ byte}}{8 \text{ bit}} \cdot \frac{1 \text{ cel}}{47 \text{ byte}} = 170,2 \text{ cel/s}$$

$$SCR = 170,2 \text{ cel/s} \cdot \frac{53 \text{ byte}}{1 \text{ cel}} \cdot \frac{8 \text{ bit}}{1 \text{ byte}} = 72170,21 \text{ bps}$$

Para 100 conexiones:

$$SCR = 100 \cdot 170,2 \text{ cel/s} = 17020 \text{ cel/s}$$

$$SCR = 100 \cdot 72170,21 \text{ bps} = 7217021 \text{ bp} \approx 7,2 \text{ Mbps}$$

4.4.2. Servicios del nivel AAL

ATM proporciona muchos tipos de servicios, que se clasifican según tres parámetros: sincronismo entre los extremos de la conexión, tipo de velocidad de transmisión y modo de conexión. A partir de aquí podemos definir cuatro clases:

- **Clase A.** Servicio orientado a conexión, con velocidad de acceso constante y relación sincronizada entre usuarios (emula un circuito PDH). Este tráfico lo genera la telefonía sin comprimir.
- **Clase B.** Servicio orientado a conexión con velocidad de acceso variable. Adecuado para aplicaciones en tiempo real que necesitan sincronismo pero en el cual no es necesaria una velocidad constante (videoconferencias con vídeo comprimido).
- **Clase C.** Servicio orientado a conexión con velocidad de acceso variable, no basada en el tiempo, por lo tanto para datos, en los que no importa el retardo, como por ejemplo TCP/IP.
- **Clase D.** Servicio no orientado a conexión parecido al datagrama de las redes de paquetes. Acepta tramas que pueden llegar al destino sin necesidad de establecer una conexión previamente.

	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Relación de usuarios	Sincronizada		No sincronizada	
Velocidad de acceso	Constante	Variable		
Modo de conexión	Orientado a conexión			Sin conexión

Para poder ofrecer estos servicios ATM define cinco tipos de niveles de adaptación en función del tipo de tráfico que debe enviarse:

- **AAL 1.** Está diseñada para el tráfico de voz. La voz es muy tolerante con los errores y por lo tanto no existe corrección de errores. Es muy importante que los paquetes lleguen ordenados y por ello se dan campos de número de secuencia.
- **AAL 2.** Está pensada para transmisión de vídeo. Necesita control de errores, ya que el vídeo no tolera tanto los errores como la voz.
- **AAL 3.** Diseñada para aplicaciones de transmisión de datos orientada a conexión.
- **AAL 4.** Para transmisiones sin conexión. La estructura es muy similar a AAL 3 y habitualmente se combinan.
- **AAL 5.** Parecida a AAL 3/4 pero con menos cabecera, ya que supone que el medio no tiene errores y el control lo pasa a niveles superiores. Consigue liberar hasta 4 bits más por el *payload*.

Clase	AAL	Características	Ejemplos
A	1	Velocidad constante, origen y destino intercambian información de sincronismo, los errores se detectan, pero no se recuperan.	Circuitos punto a punto Telefonía Imágenes
B	2	Transferencia de información generada a velocidad variable, pero sincronizada, los errores se detectan, sin embargo no se recuperan.	Vídeo por demanda Difusión de TV
C y D	3/4	Para datos sensibles a las pérdidas de celdas, pero no al retardo. Son dos AAL diferentes, no obstante se combinan.	<i>Frame relay</i> TCP/IP WWW
C y D	5	Es una mejora del tipo 3/4 que reduce la cabecera en cada celda y mejora la detección de errores.	<i>LAN emulation</i> <i>Internet</i>

4.5. Gestión del tráfico

Como hemos comentado anteriormente, el usuario accede a la red de banda ancha mediante la interfaz UNI. El usuario debe contratar una conexión, lo que significa que la red ha de establecer un camino, y lo más importante es que este camino debe cumplir unos determinados parámetros de calidad (QoS), como caudal o retardo.

En cualquier caso, la red dispone de unos mecanismos de control que han de servir para efectuar el control de los recursos que el usuario utiliza. La red ofrece una restricción sobre el caudal que el usuario genera. Si el volumen de datos supera un cierto umbral, se desbordará. No obstante, admite una cierta tolerancia o ciertas ráfagas.

Ejemplo

Un equipo puede solicitar a la red una velocidad media de 3 Mbit/s, con un retardo de 10 mseg, o también podría añadir en la petición la posibilidad de transmitir picos de 100 Mbit/s con una duración máxima de 1 mseg.

4.5.1. Definición de parámetros de contrato de tráfico

Para poder comprender cómo se contrata una determinada calidad de servicio en una red ATM, hemos de definir los parámetros que utiliza ATM con este objetivo. No todos estos parámetros se contratan; depende del servicio que deseamos.

Los parámetros de tráfico son los siguientes:

- **PCR** (*peak cell rate*), velocidad máxima de transmisión de una conexión.
- **SCR** (*sustainable cell rate*), velocidad media sostenida.
- **MBS** (*maximum burst size*), tamaño de la ráfaga que puede transmitir una conexión ATM.
- **MCR** (*minimum cell rate*), velocidad mínima que la red debe garantizar.

Se definen los **descriptores de tráfico** como el conjunto de parámetros que permiten describir un perfil de tráfico en función de un conjunto de valores, como el SCR, el PCR, etc. El conjunto de parámetros varía en función del tipo de conexión contratada.

Existen, además, los parámetros de QoS, que nos indican cuál es la garantía de poder llevar a cabo la transmisión correctamente. Son los siguientes:

- **CDV** (*cell delay variation*). Define la variación del retardo máximo de recepción de dos celdas ATM consecutivas.
- **CTD** (*cell transfer delay*). Es el máximo retardo fijo de transferencia de celdas extremo/extremo.
- **CLR** (*cell loss ratio*). Es la relación de celdas perdidas respecto del total de celdas transmitidas.

Un tercer tipo de parámetros que se ha de especificar es el de la **categoría de servicio** que se quiere utilizar. ATM define cuatro categorías de servicio, cada una corresponde a una de las clases de servicio (A, B, C y D):

- **CBR** (*constant bit rate*). Son servicios de tasa constante entre emisor y receptor. Corresponde a la clase de servicio A.
- **VBR** (*variable bit rate*). Son servicios de tasa variable. Es preciso definirles un retardo máximo entre emisor y receptor. Corresponde a la clase de servicio B.
- **UBR** (*unspecified bit rate*). Para tráfico de aplicaciones que no son en tiempo real y que no necesitan calidad de servicio. Corresponde a la clase C.
- **ABR** (*available bit rate*). Son servicios de tasa disponible. Mejoran los servicios que ofrece UBR gracias a información de red sobre la base del conocimiento del caudal instantáneo disponible. Corresponde a la clase C.

4.5.2. Control de congestión

El control de congestión ATM permite a los operadores de red llevar el máximo de tráfico posible sin afectar a la QoS demandada por los usuarios.

Si una nueva conexión es aceptada, la red ATM proporcionará la QoS demandada sin afectar a la QoS de las otras conexiones existentes. Eso se consigue a través del control de congestión y los algoritmos de *scheduling*, que permiten decidir en qué orden son conmutadas las celdas en los conmutadores ATM.

El control de congestión puede ser **preventivo o reactivo**.

1) En el caso **preventivo**, como el nombre indica, se intenta prever la congestión de red antes de que ésta se produzca. Esto se realiza mediante algoritmos de control de admisión de conexión CAC. El CAC decide si acepta o no una nueva conexión. Si lo acepta, entonces la política CAC gestiona la cantidad de datos que son transmitidos en cada conexión.

CAC es la sigla de *connexion admission control*.

2) En el control **reactivo**, el control de congestión se gestiona regulando la transmisión del dispositivo remoto por medio de los mensajes de respuesta.

4.5.3. Control de congestión preventivo

El CAC se ejecuta en el nivel de conexión. Cabe determinar si acepta o no una nueva conexión. Una vez ésta ha sido aceptada, hay que asegurarse de que el ancho de banda necesario se mantenga dentro de los parámetros de tráfico negociados.

Vamos a verlo con un caso concreto. Supongamos que un dispositivo origen quiere establecer una conexión con un dispositivo destino. Para hacerlo, se establece un circuito virtual SVC entre los dos dispositivos mediante un mensaje de establecimiento. Este mensaje de establecimiento contiene diferentes tipos de información, entre los cuales se encuentran valores de tráfico y parámetros de QoS. Esta información la usan los diversos nodos intermedios dentro de la ruta para decidir si se tiene que aceptar la conexión o tiene que ser rechazada. Tal decisión se toma en función de dos preguntas:

- ¿La nueva conexión afectará a la QoS de las conexiones existentes soportadas por el nodo?
- ¿Puede el nodo proporcionar la QoS que demanda la nueva conexión?

En la ruta de la nueva conexión, cada nodo decide de forma independiente de los otros nodos si dispone de suficiente ancho de banda para proporcionar la QoS solicitada por la conexión. Este proceso se realiza mediante el algoritmo CAC.

Los algoritmos CAC se pueden clasificar en dos tipos:

1) **Asignación de tráfico no estadístico** (*nonstatistical bandwidth allocation*) o PCR. Este tipo de asignación se usa para conexiones que demandan servicios CBR. En este caso, el algoritmo CAC es muy sencillo, ya que la decisión de aceptar o rechazar una nueva conexión se basa sólo en si la velocidad máxima de transmisión (PCR) es más pequeña que el ancho de banda disponible de la línea.

PCR es la sigla de *peak cell rate*.

Allí donde se usa la asignación no estadística para todas las conexiones establecidas a través de una línea, la suma de los PCR de todas las conexiones es

más pequeña que la capacidad de la línea. Esta solución puede conllevar una baja utilización de la línea, a no ser que las conexiones transmitan constantemente la máxima velocidad de transmisión (PCR).

2) Asignación de ancho de banda estadístico (*statistical bandwidth allocation*). En este caso, la asignación del ancho de banda en la salida de la línea es más pequeña que la tasa del pico de la fuente. Si la asignación estadística se utiliza para todas las conexiones en la línea, la suma de las tasas del pico de todas las conexiones puede exceder la capacidad de la línea. La asignación estadística tiene sentido económicamente cuando se trata de fuentes a ráfagas, pero, en cambio, es complicado implementarlo de forma efectiva. Ello se debe al hecho de que no siempre es posible caracterizar de forma precisa el tráfico generado por la fuente.

La mayoría de los algoritmos CAC propuestos están basados en el parámetro de QoS de tasa de celdas perdidas. La decisión de aceptar o rechazar una nueva conexión se basa en si el conmutador puede proporcionar una nueva conexión con la tasa de celdas perdidas demandada sin afectar a la tasa de celdas perdidas de las conexiones ya existentes.

Mecanismos de decisión en el descarte de paquetes

El mecanismo se llama etiquetado de violación (*violation tagging*), y lo que intenta es llevar las celdas que no cumplen los requisitos si hay bastante capacidad en la red. Las celdas que violan las normas son etiquetadas en el UNI, y entonces se les permite entrar en la red. Si la congestión aumenta dentro de la red, las celdas etiquetadas son eliminadas. El etiquetado se hace mediante CPL dentro de la cabecera ATM. Cuando no está etiquetado, $CPL = 0$, y cuando está etiquetado, $CPL = 1$.

CPL es la sigla de *cell loss priority*.

Una vez tenemos los dos tipos de celdas, hay que ver cómo son tratadas. Hay dos mecanismos basados en prioridades:

- **Push-out scheme.** En este caso, los dos tipos de celdas acceden a la cola del conmutador siempre que no esté llena. Si una celda etiquetada llega durante el periodo en que el conmutador está lleno, entonces se descarta. Si es una celda no etiquetada la que llega en un periodo en que la cola está llena, entonces se descarta la última celda etiquetada que esté en la cola y se pone la celda no etiquetada en su lugar. La celda no etiquetada se descartará si la cola está llena de celdas no etiquetadas.
- **Threshold scheme.** En este esquema se permiten los dos tipos de celdas mientras no se llegue al umbral. Una vez estemos por encima del umbral, sólo se aceptarán celdas no etiquetadas.

El primer esquema es más eficiente, aunque se prefiere el segundo por la simplicidad de implementación.

4.5.4. Control de congestión reactivo

Conceptualmente, el control de congestión reactivo permite que la fuente transmita sin ninguna reserva ni política de ancho de banda y que se tomen acciones sólo cuando se produzca la congestión. La red, en este caso, tiene que estar continuamente monitorizada. Cuando se empieza a detectar congestión, se envía un mensaje a las fuentes para que reduzcan la transmisión, o incluso se puede indicar que paren el envío. Una vez se vaya descongestionando la red, se volverá a informar a las fuentes para que vayan incrementando sus tasas de transmisión. El método más sencillo de medir la congestión es mirar la ocupación de las colas de salida de los conmutadores más críticos.

La única categoría de servicio estandarizada que usa el control de congestión reactivo es ABR.

ABR es la sigla de *available bit rate*.

El ABR es un mecanismo basado en la realimentación, por el cual la fuente emisora puede transmitir más durante los periodos de tiempo en los que la red va menos cargada. En el establecimiento, el emisor solicita una tasa de celdas mínima (MCR). También especifica una tasa de celdas máxima (PCR). La red acepta la nueva conexión si puede satisfacer la demanda de MCR. Si ocurre que la red no utiliza todo el ancho de banda, la tasa de transmisión de la fuente puede exceder el MCR. Cuando se empieza a producir congestión, se requiere a la fuente que reduzca su tasa de transmisión. Lo que no se hará es bajar su tasa por debajo del valor de MCR. El ABR, como sabéis, no está destinado a aplicaciones en tiempo real.

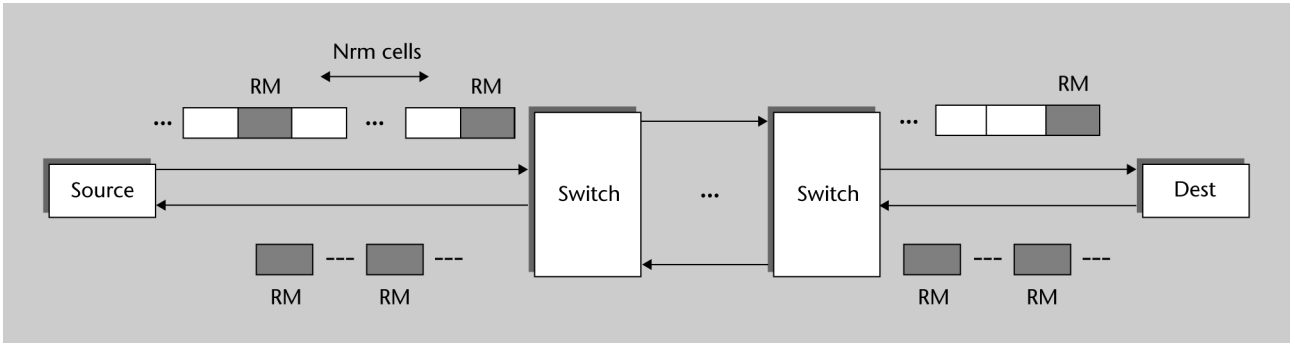
MCR es la sigla de *minimum cell rate*.

Así, como ya se ha explicado, la fuente emisora incrementará o reducirá su tasa de transmisión en función de los mensajes que reciba de la red.

El mecanismo a través del cual la red informa a la fuente para que cambie su tasa de transmisión está implementado mediante las celdas RM. Estas celdas se diferencian del resto, ya que llevan el indicador de tipo de carga (PTI), con un valor de 110.

RM es la sigla de *resource management*.

Figura 45. Mecanismo ABR




5. Multiprotocol label switching

El Multiprotocol Label Switching (MPLS) es un mecanismo de transporte de datos estándar creado por la IETF y definido en el RFC 3031.

La industria ha estado buscando una solución que combine las mejores características de IP y ATM. Eso ha conducido a MPLS. El desarrollo de MPLS en las redes de los operadores de Internet es posible, ya que es transparente para el usuario. Por otra parte, tiene grandes consecuencias para la arquitectura. MPLS ha cambiado el modelo de conmutación *unicast* basado en la destinación, que se había mantenido prácticamente inalterable desde el principio de Internet. A la vez, también ha impactado en la arquitectura de encaminamiento haciendo que los protocolos de encaminamiento ejecuten nuevas y más complejas tareas.

Así, MPLS es una red privada IP que combina la flexibilidad de las comunicaciones punto a punto o internet y la fiabilidad, calidad y seguridad de las líneas privadas, Frame Relay o ATM.

5.1. Problemas experimentados por los proveedores de servicio

Veamos primero qué problemas de las redes actuales han hecho plantearse a los operadores la búsqueda de una nueva tecnología: 

- IP y ATM son dos tecnologías desarrolladas de manera separada sin nexos de unión. Los *switchs* ATM se encargan de mover tráfico en función de los VCI/VPI de los que los encaminadores de acceso (en los POP) no tienen conocimiento. Lo mismo sucede a la inversa. Los encaminadores realizan el encaminamiento sin tener en cuenta los *switchs* (son transparentes para el encaminador).
- Escalabilidad. Para tener máxima redundancia y encaminamiento óptimo hay que crear una topología de circuitos virtuales *full mesh*. Eso crea un problema de escalabilidad.
- *Traffic engineering*. TE es el proceso por el que el tráfico se hace óptimo para seguir ciertos caminos basados en requisitos específicos. ATM dispone de muchas características para TE. IP también tiene alguna. El problema es que al tener dos tecnologías totalmente separadas resulta complicado combinarlas para tener TE extremo a extremo.
- QoS. Pasa lo mismo que en el caso anterior. Las dos tecnologías disponen de mecanismos para proporcionar QoS, pero resulta complicado combinarlas.

5.2. ¿Qué es MPLS?

MPLS es un método de encaminamiento de paquetes en la red que usa etiquetas insertadas en el paquete IP.

Las etiquetas se insertan entre la cabecera de los niveles 2 y 3 en tecnologías basadas en tramas y están contenidas en el VPI/VCI en las tecnologías basadas en celdas.

MPLS combina conmutación de nivel 2 y encaminamiento de nivel 3.

Con conmutación de etiquetas el análisis de la cabecera nivel 3 se realiza sólo una vez, al ingresar en la red MPLS. En este punto, la cabecera nivel 3 se registra en una etiqueta de longitud fija.

5.3. Beneficios de MPLS

La conmutación basada en etiquetas permite a los encaminadores y a los *switchs* ATM-MPLS tomar decisiones de envío basadas en una sencilla etiqueta, en vez de realizar una búsqueda de ruta basada en la IP destino. Los beneficios que aporta a la red IP son los siguientes:

- VPN. Los proveedores pueden crear VPN nivel 3 mediante su *backbone* de red para diferentes clientes, usando la misma infraestructura sin necesidad de encriptación y aplicaciones de usuario.
- *Traffic engineering*. Permite optimizar la utilización del ancho de banda de la red y optimizar los caminos.
- QoS. Posibilita aprovechar las características de QoS de IP y ATM.
- Integra IP y ATM.

5.4. Características de MPLS

MPLS ofrece niveles de rendimiento diferenciados y priorización del tráfico, y también aplicaciones de voz y multimedia. Sus características más importantes son las siguientes:

- MPLS aprovecha las ventajas de ATM, pero sin sus inconvenientes.
- Asigna a los datagramas de cada flujo una etiqueta única que permite una conmutación rápida en los enrutadores intermedios (solo se mira la etiqueta y no la dirección de destino).
- Las principales aplicaciones son:

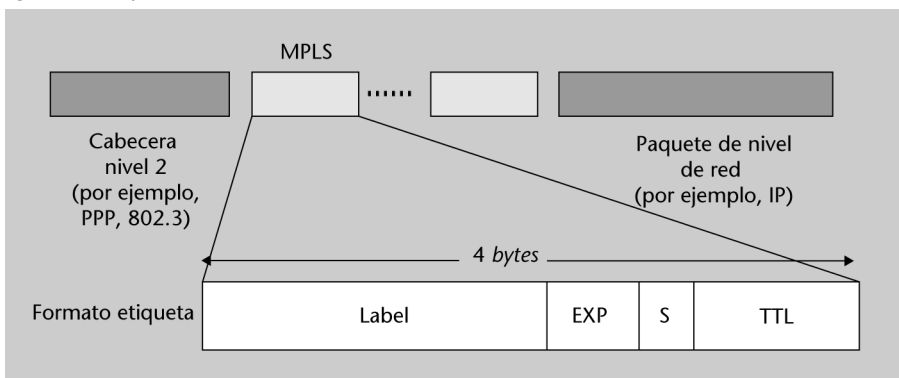
- Funciones de ingeniería de tráfico (a los flujos de cada usuario se les asocia una etiqueta diferente).
- Políticas de enrutamiento.
- Servicio de VPN.
- Servicios que requieren QoS.
- MPLS se basa en el etiquetado de los paquetes de acuerdo con criterios de prioridad o calidad de servicio.
- MPLS basa la conmutación de los paquetes o datagramas en función de las etiquetas añadidas en la capa 2 y etiqueta estos paquetes según la clasificación establecida por la calidad de servicio en la SLA.
- MPLS es una tecnología que permite ofrecer QoS, independientemente de la red sobre la que se implante.
- El etiquetado en la capa 2 permite ofrecer servicios multiprotocolo y ser portable sobre multitud de tecnologías de capa de enlace: ATM, Frame Relay, líneas dedicadas o LAN.

Para poder crear los circuitos virtuales como ATM, se pensó en añadir etiquetas a los paquetes. Estas etiquetas definen el circuito virtual para toda la red.

5.5. Pila de etiquetas MPLS (*MPLS label stack*)

MPLS, por lo tanto, aparece inicialmente como una tecnología que permite relacionar ATM y IP. La pila de etiquetas MPLS tiene cuatro octetos y es como la de la figura 23.

Figura 46. Etiqueta MPLS



Los campos que se muestran en la figura 23 son:

- **Label:** tiene la etiqueta y es de 20 bits.
- **Experimental (EXP):** tres bits y sirve para realizar un mapeo al campo ToS de IP en el campo EXP para MPLS CoS.
- **S:** MPLS permite incorporar más de una etiqueta.
- **TTL:** tiempo de vida del paquete.

5.5.1. Cabecera insertada (*shim header*)

Una vez hemos visto cómo es la etiqueta hace falta saber dónde va. La etiqueta se incrusta entre la cabecera de nivel 2 y la cabecera de nivel 3. Como se ve, la etiqueta MPLS va antes de la cabecera IP, de modo que los encaminadores pueden conmutar en función de la etiqueta en vez de la cabecera IP.

5.5.2. *Forwarding equivalence class* (FEC)

Conjunto de paquetes de nivel 3 reenviados de la misma forma por el mismo camino y con el mismo tratamiento en el envío.

Ejemplos de FEC

Algunos ejemplos de FEC pueden ser:

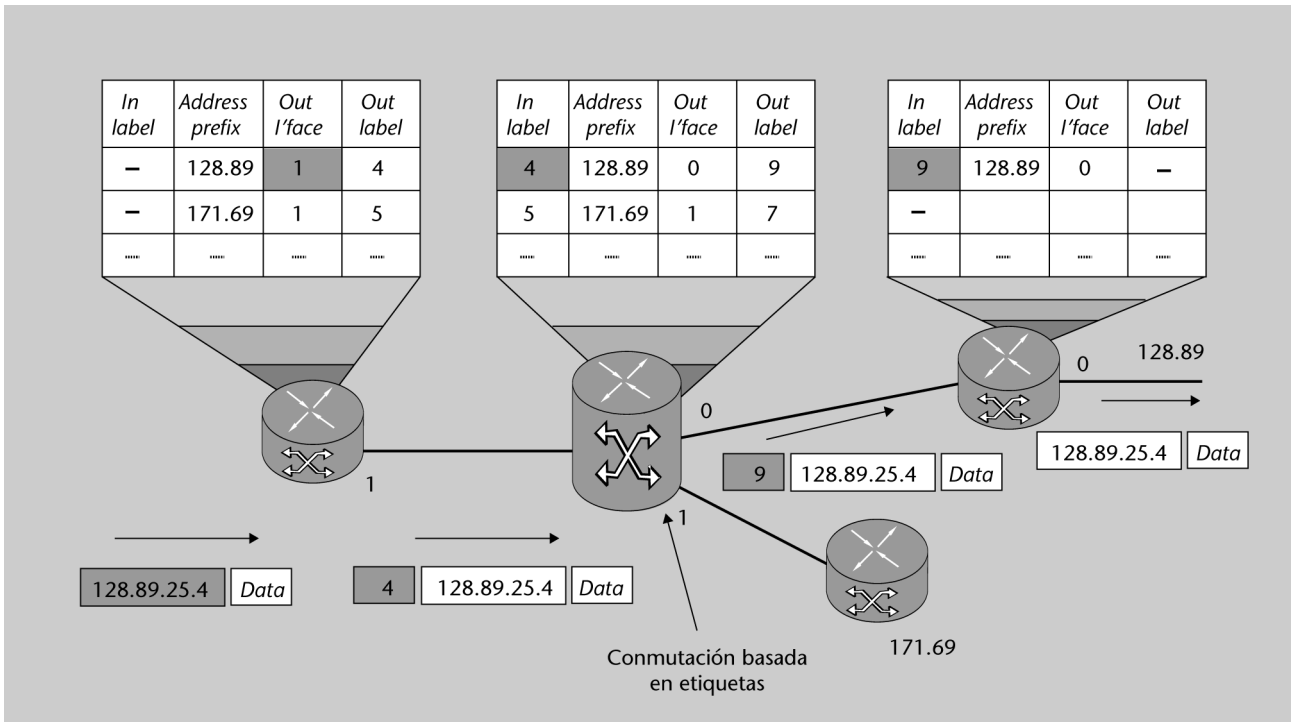
- Paquetes de nivel 3 que tienen cierto prefijo de red.
- Paquetes de nivel 3 que van a un destino concreto.

5.6. Arquitectura MPLS

La arquitectura MPLS está formada por dos planos:

- **Control.** El plano de control es responsable de unir una etiqueta con las rutas de la red (FEC) y redistribuir esta unión a los otros encaminadores MPLS. Como estamos diciendo que se une la etiqueta a una ruta de red es necesario que el encaminador tenga una tabla de encaminamiento. Para redistribuir las etiquetas el protocolo básico es LDP (*label distribution protocol*). El LIB (*label information base*) es un mapeo de etiquetas de entrada con etiquetas de salida, junto con interfaz de salida e información de la línea. Como se ha comentado anteriormente el FEC (*forwarding equivalence class*) es un grupo de paquetes IP que son tratados del mismo modo. Por ejemplo, una subred destino puede corresponder a un FEC. FEC está basado en varios criterios, como pueden ser IP ToS bits, números de puerto, etc.
- **Encaminamiento (*forwarding*).** Un encaminador MPLS conmuta los paquetes IP en lugar de encaminarlos. Así, la tabla LIB se construye en el plano de control y sólo aquellas etiquetas en uso residen en *label forwarding information base* (LFIB). Por lo tanto, LFIB es un subconjunto de LIB. Otro componente del plano de *forwarding* es la tabla *forwarding information base* (FIB). La crea Cisco cuando usa *Cisco express forwarding* (CEF).

Figura 47. Conmutación MPLS

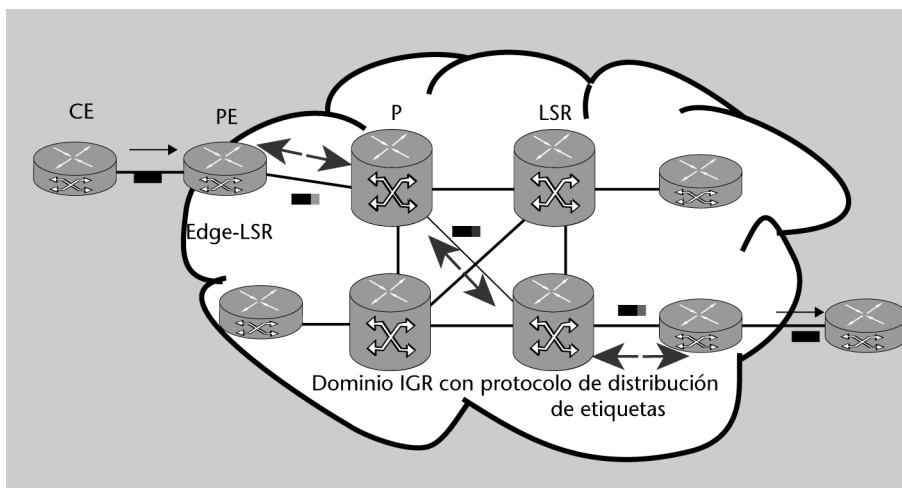


5.7. Componentes de red MPLS

Los componentes de red MPLS son los siguientes (figura 25):

- **CE (customer edge)**. Encaminador que conecta la red de usuario con el proveedor de servicio.
- **PE (provider edge)**. Encaminador de la operadora que conecta al usuario con la red del proveedor.
- **P (provider)**. Equipo que está en la red del proveedor y que sólo está conectado con otros equipos de la operadora.

Figura 48. Componentes de la red MPLS



Los equipos PE y P son *label switch routers* (LSR). Se pueden distinguir dos tipos de LSR:

- **LSR** es un encaminador/*switch* capaz de conmutar paquetes basado en etiquetas. El CE no es un equipo LSR.
- **Edge-LSR**. Término más específico para los encaminadores PE. En el caso de las redes MPLS es el equipo que toma el tráfico IP no etiquetado y pone una etiqueta para enviarlo al siguiente LSR. También realiza el proceso inverso. Cuando recibe un paquete de un LSR saca la etiqueta antes de enviarlo al siguiente nodo de la red IP.
- **Label switched path (LSP)**. Es el conjunto de LSR que el paquete ha de seguir en su flujo hacia el destino.

LSP son adecuados usando varios protocolos en función de los distintos módulos de control necesarios: LDP, *resource reservation protocol* con *traffic engineering extensions* (RSVP-TE), *constraint-based routed LDP* (CR-LDP) o extensiones de protocolos de encaminamiento como *multiprotocol BGP*.

El LSP puede ser considerado el camino sobre un conjunto de LSR que los paquetes que pertenecen a cierto FEC usan en su viaje para obtener su destino.

5.7.1. Establecimiento del LSP

El establecimiento del LSP se puede realizar de dos modos:

- Con control independiente.
- Con control por orden.

Los dos métodos tienen sus ventajas y sus inconvenientes. El control independiente permite una convergencia más rápida, mientras que el control por orden permite una capacidad mayor de prevención de bucles.

Establecimiento LSP con control independiente

En el método de control independiente para establecer los LSP, cada LSR divide sus prefijos de destinación en FEC. Las etiquetas se asignan a cada FEC, y la unión de etiquetas es informada a cada vecino LSR. Los LSR crean una LFIB realizando un mapeo entre los FEC y sus saltos siguientes. El LSR normalmente emplea un protocolo de encaminamiento *unicast* tipo OSPF y usa la información proporcionada por éstos para crear el mapeo FEC en el salto siguiente.

Después de crear la unión local, el LSR distribuye información de las uniones locales a sus vecinos LSR, usando LDP o extensiones de un protocolo de encaminamiento modificado.

Cuando un LSR adyacente recibe información de una etiqueta de unión de un vecino, examina la presencia de una unión local en sus LFIB. Si existe unión local, actualiza la etiqueta de salida para aquella entrada con el valor de la nueva etiqueta recibida. El LSR tiene ahora una entrada LFIB completa y preparada para reenviar paquetes.

La unión de etiquetas se distribuye sólo entre encaminadores adyacentes.

En casos como de ingeniería de tráfico MPLS, la distribución de información basada en restricciones debe ser ejecutada en orden para encontrar los caminos adecuados mediante la red. La información de las restricciones ha de ser distribuida de manera consistente por medio de la red MPLS.

Establecimiento LPS con control por orden

En el método de control por orden para establecer los LSP, los *LSR ingress o egress* inician el proceso. Quien inicia realiza la selección de FEC, y todos los LSR mediante el LSP usan el mismo FEC. El control por orden del establecimiento LSP requiere que la unión de etiquetas se propague por todos los LSR antes de que se puedan establecer los LSP. Eso hace que la convergencia sea más lenta. En cambio tiene una capacidad mayor para prevenir bucles.

Se suele usar el modo de control independiente para el establecimiento en entornos basado en paquetes y el modo de control para orden en ATM.

5.8. Protocolo de distribución de etiquetas (LDP)

El protocolo de distribución de etiquetas (LDP) se usa conjuntamente con protocolos de encaminamiento de nivel 3 para distribuir información de etiquetas entre los dispositivos LSR en una red conmutada por etiquetas. LDP distribuye etiquetas entre vecinos mediante el protocolo TCP puerto 646.

LDP: *label distribution protocol*.

El objetivo de LDP es ayudar en el establecimiento de LSP usando una serie de procedimientos para distribuir las etiquetas entre vecinos LSR.

LDP proporciona un mecanismo para descubrir a los vecinos y establecer comunicación. Define cuatro clases de mensajes:

- Descubrimiento (*discovery*). Discurren sobre UDP y usan mensajes HELLO *multicast* para aprender sobre los vecinos LSR que tienen directamente conectados. Entonces establecen una conexión TCP y una sesión LDP eventual. Las sesiones LDP son bidireccionales. El LSR en el otro extremo puede informar o pedir información de uniones del otro extremo de la conexión.
- Adyacencia (*adacency*). Discurre sobre TCP y proporciona inicio de sesión, de manera que permite negociar ciertos parámetros de funcionamiento entre vecinos.

- Información de etiquetas (*label advertisement*). Proporciona información de las etiquetas y el FEC correspondiente.
- Notificación (*notification*). Permite enviar mensajes de aviso para informar básicamente de problemas.

La distribución y asignación de etiquetas con LDP se puede ejecutar de diferentes modos:

- *Downstream-on-demand mode LDP*. Permite al LSR pedir de manera explícita al siguiente salto, para un FEC particular, la etiqueta que hay que unir a este FEC.
- *Unsolicited downstream mode LDP*. Permite al LSR distribuir una unión en el vecino LSR, aunque éste no lo haya pedido explícitamente.

Cualquiera de los dos modos pueden ser usados en la misma red simultáneamente. Esto se negocia entre LSR durante la fase de inicialización (*initialization*).

Figura 49. Negociación LDP

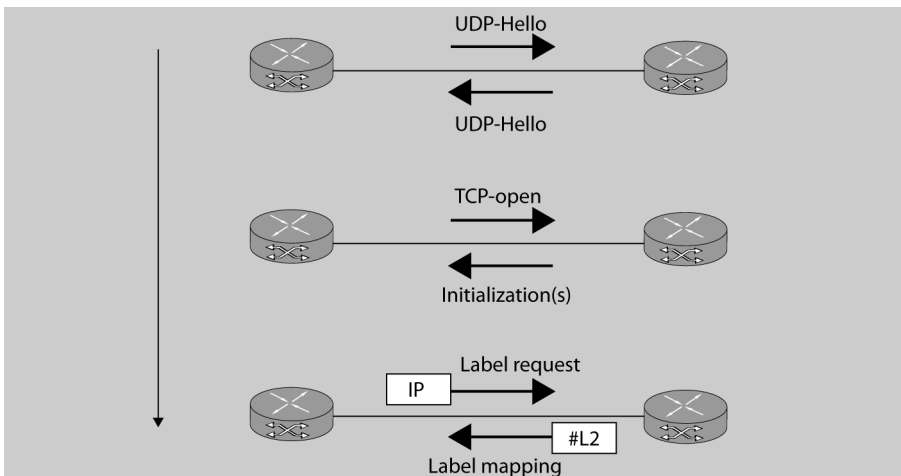
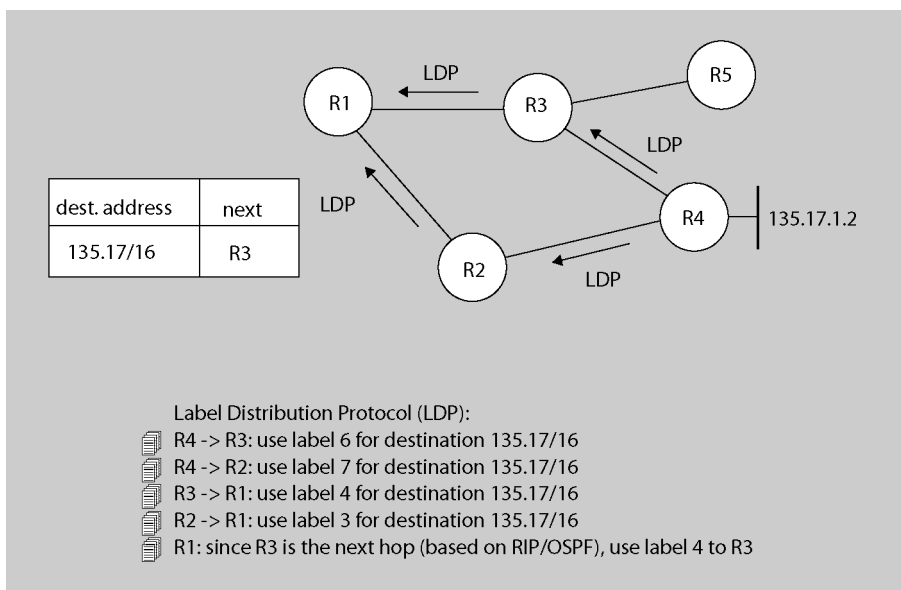


Figura 50. Ejemplo de distribución de etiquetas

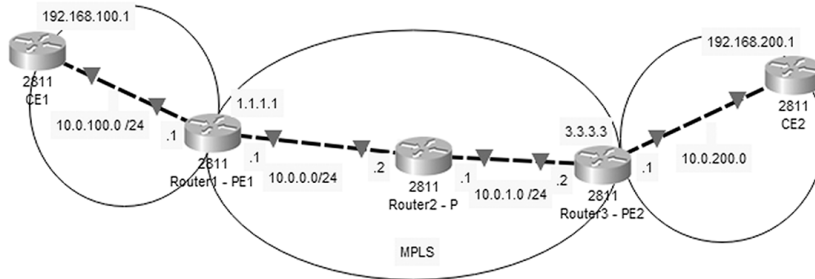


5.9. Ejemplo de topología MPLS

A continuación, se muestra una topología donde tenemos dos sedes, CE1 y CE2, con direcciones 192.168.100.1 y 192.168.200.1 que se conectan mediante una red MPLS. La red MPLS está formada por dos enrutadores PE, Router1-PE1, que denominaremos R1, y Router3-PE2, que denominaremos R3, y un enrutador P, el Router2-P, que denominaremos R2. En la figura se muestran las direcciones utilizadas por cada una de las redes. Lo que se quiere es lo siguiente:

- Mostrar la configuración básica.
- Tablas de conmutación MPLS.
- Captura de tráfico para ver cómo se insertan y extraen las etiquetas en los enrutadores PE y P.

Figura 51. Ejemplo de topología de red MPLS



Lo primero que se muestra es la configuración básica de los enrutadores:

Tenemos las redes extremo conectadas a CE1 y CE2, respectivamente. Estos dos enrutadores solo tienen configurado el enlace fastEthernet, que los conecta con los PE, R1 y R3, respectivamente, y una ruta por defecto. Para simular la red que se conecta al CE, se ha trabajado con direcciones *loopback* en los dos enrutadores.

Configuración básica de los enrutadores CE1 y CE2

Configuración CE1	Configuración CE2
hostname CE1	hostname CE2
interface Loopback0	interface Loopback0
ip address 192.168.100.1 255.255.255.255	ip address 192.168.200.1 255.255.255.255
!	!
interface FastEthernet0/0	interface FastEthernet0/0
ip address 10.0.100.2 255.255.255.0	ip address 10.0.200.2 255.255.255.0
!	!
ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 10.0.100.1	ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 10.0.200.1

A continuación, se muestra la configuración de R1 y R3, que son los dos enrutadores PE. Lo más importante de estas configuraciones radica en las interfaces fastEthernet, que conectan con la red MPLS. En este caso, mediante el comando *mpls ip*, se indica que trabajen con etiquetas MPLS dinámicas. Por otro lado,

necesitamos establecer una sesión multiprotocolo BGP entre R1 y R3, tal como se muestra en la configuración.

Configuración R1	Configuración R3
<pre>hostname R1 ! interface Loopback0 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255 ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.0.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto mpls ip ! interface FastEthernet0/1 ip address 10.0.100.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto ! router ospf 1 log-adjacency-changes network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0 network 10.0.0.0 0.0.0.255 area 0 ! router bgp 1 no synchronization bgp log-neighbor-changes network 10.0.100.0 mask 255.255.255.0 redistribute static neighbor 3.3.3.3 remote-as 1 neighbor 3.3.3.3 update-source Loopback0 no auto-summary ! ip route 192.168.100.0 255.255.255.0 10.0.100.2 !</pre>	<pre>hostname R3 ! interface Loopback0 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255 ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.1.3 255.255.255.0 duplex auto speed auto mpls ip ! interface FastEthernet0/1 ip address 10.0.200.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto ! router ospf 1 log-adjacency-changes network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0 network 10.0.1.0 0.0.0.255 area 0 ! router bgp 1 no synchronization bgp log-neighbor-changes network 10.0.200.0 mask 255.255.255.0 redistribute static neighbor 1.1.1.1 remote-as 1 neighbor 1.1.1.1 update-source Loopback0 no auto-summary ! ip route 192.168.200.0 255.255.255.0 10.0.200.2 !</pre>

El enrutador R2 trabaja como dispositivo de tipo P en la red MPLS y, si nos fijamos, su configuración es sencilla. Del mismo modo que sucedía en los enrutadores R1 y R3, hay que activar *mpls ip* en las dos interfaces conectadas.

Configuración R2
<pre>hostname R2 ! interface Loopback0 no ip address ! interface FastEthernet0/0 ip address 10.0.0.2 255.255.255.0</pre>


```

duplex auto
speed auto
mpls ip
!
interface FastEthernet0/1
ip address 10.0.1.2 255.255.255.0
duplex auto
speed auto
mpls ip
!
router ospf 1
log-adjacency-changes
network 10.0.0.0 0.0.0.255 area 0
network 10.0.1.0 0.0.0.255 area 0
!

```

En la figura siguiente se muestran los *logs* en los que se ve que el nodo R2 (enrutador de tipo P) se ha mandado un mensaje LDP con sus vecinos una vez que le hemos indicado que trabaje con MPLS.

Figura 52.

```

R2(config-router)#mpls ldp autoconfig
R2(config-router)#
*Mar  1 00:08:04.499: %LDP-5-NBRCHG: LDP Neighbor 1.1.1.1:0 (1) is UP
R2(config-router)#
*Mar  1 00:08:22.887: %LDP-5-NBRCHG: LDP Neighbor 3.3.3.3:0 (2) is UP

```

A continuación, se muestran las tablas de conmutación de los tres nodos MPLS. R1 es un nodo PE. En este enrutador se ve que, para acceder a la red remota 3.3.3.3, pondrá la etiqueta 17 y enviará el paquete al enrutador 10.0.0.2.

Figura 53. Tabla enrutador R1

```

R1#sh mpls forwarding-table
Local  Outgoing  Prefix          Bytes tag  Outgoing     Next Hop
tag    tag or VC  or Tunnel Id    switched   interface
16     17         3.3.3.3/32      0          Fa0/0        10.0.0.2
17     Pop tag    10.0.1.0/24     0          Fa0/0        10.0.0.2
18     Untagged  192.168.100.0/24 0          Fa0/1        10.0.100.2

```

El enrutador R2 es un enrutador de tipo P. Tal como se puede observar en la figura siguiente, cuando le llega un paquete con etiqueta 16, R2 conmuta sin etiqueta, puesto que la tabla le indica que el salto siguiente es un enrutador PE y, en consecuencia, ya no es necesario que vuelva a etiquetar. Lo mismo sucede con los paquetes con etiqueta 17. Una vez que recibe el paquete con etiqueta 17, lo conmuta por la interfaz fa0/1 sin etiquetar, dado que el nodo siguiente es un nodo PE. En este caso sucede esto porque si examinamos la topología solo tenemos un nodo P.

Figura 54. Tabla enrutador R2

```

R2#sh mpls forwarding-table
Local  Outgoing  Prefix          Bytes tag  Outgoing     Next Hop
tag    tag or VC  or Tunnel Id    switched   interface
16     Pop tag    1.1.1.1/32      0          Fa0/0        10.0.0.1
17     Pop tag    3.3.3.3/32      126       Fa0/1        10.0.1.3

```

R3 es similar a R1. La figura siguiente nos muestra la tabla de encaminamiento. En este caso, si miramos la primera entrada de la tabla, podemos ver que R3 utiliza la etiqueta 16 cuando se envían paquetes al destino 1.1.1.1.

Figura 55. Tabla enrutador R3

```
R3#sh mpls forwarding-table
```

Local tag	Outgoing tag or VC	Prefix or Tunnel Id	Bytes tag switched	Outgoing interface	Next Hop
16	16	1.1.1.1/32	0	Fa0/0	10.0.1.2
17	Pop tag	10.0.0.0/24	0	Fa0/0	10.0.1.2
18	Untagged	192.168.200.0/24	0	Fa0/1	10.0.200.2

Finalmente, usamos el comando *traceroute*. Este comando nos va indicando todos los saltos realizados (enrutadores intermedios por donde pasa) desde el origen hasta el destino. Nos sirve para comprobar lo que se ha explicado en las tablas de conmutación y ver cómo cada nodo va incorporando, modificando o extrayendo la etiqueta MPLS.

Lo haremos en dos casos:

1) entre R1 y la dirección destino 3.3.3.3. Si nos fijamos, para llegar al destino da dos saltos. El primero va de R1 (PE) hasta R2 (P), que, al estar dentro de la red MPLS, incorpora la etiqueta 17. El segundo salto va de R2 (P) hasta R3 (PE) y, en este caso, ya no hay que etiquetar.

Figura 56. *Traceroute* entre R1 y la dirección 3.3.3.3

```
R1#traceroute 3.3.3.3
```

```
Type escape sequence to abort.
```

```
Tracing the route to 3.3.3.3
```

```
 1 10.0.0.2 [MPLS: Label 17 Exp 0] 36 msec 20 msec 32 msec
```

```
 2 10.0.1.3 28 msec 44 msec 24 msec
```

2) En este segundo caso se muestra el camino entre R3 y la dirección *loopback* generada en R1 (1.1.1.1). Ahora R3 etiqueta con valor 16 cuando envía el paquete a R2. En el segundo salto, R2 envía el paquete a R1 sin etiquetar porque sabe que R1 es un enrutador PE.

Figura 57. *Traceroute* entre R3 y la dirección 1.1.1.1

```
R3#traceroute 1.1.1.1
```

```
Type escape sequence to abort.
```

```
Tracing the route to 1.1.1.1
```

```
 1 10.0.1.2 [MPLS: Label 16 Exp 0] 28 msec 44 msec 24 msec
```

```
 2 10.0.0.1 24 msec 20 msec 24 msec
```

Para ver cómo los paquetes se envían con la cabecera MPLS y poder examinar los diversos campos, realizamos un *ping* entre R1 y la dirección *loopback* de R3. En paralelo, capturamos con un analizador de protocolos el tráfico que llega a la interfaz fastEthernet0/0 del enrutador R2.

La captura del analizador de protocolos se puede observar en la figura siguiente. La figura nos muestra que al enrutador R2 le llega el paquete con la cabecera MPLS, que –como se ha explicado– se inserta entre la cabecera Ethernet y la cabecera IP. La cabecera en hexadecimal tiene el valor: 00 01 11 ff. Los 20 bits de más peso de la cabecera corresponden a la etiqueta y serían: 00 01 1 (en hexadecimal), que pasado a decimal es el número 17. Nos muestra también que los bits del campo Experimental están a 0 y el tiempo de vida (TTL) está a 255.

Figura 58. Captura con analizador de protocolos de un paquete *ping* para mostrar cabecera MPLS

```

> Frame 16: 118 bytes on wire (944 bits), 118 bytes captured (944 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: c2:01:f3:cc:00:00 (c2:01:f3:cc:00:00), Dst: c2:02:ed:b4:00:00 (c2:02:ed:b4:00:00)
* MultiProtocol Label Switching Header, Label: 17, Exp: 0, S: 1, TTL: 255
  0000 0000 0000 0001 0001 ..... = MPLS Label: 17
    ..... = MPLS Experimental Bits: 0
    .....1 ..... = MPLS Bottom Of Label Stack: 1
    ..... 1111 1111 = MPLS TTL: 255
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.1, Dst: 3.3.3.3
> Internet Control Message Protocol
0000  c2 02 ed b4 00 00 c2 01 f3 cc 00 00 88 47 00 01
0010  11 ff 45 00 00 64 00 00 00 00 ff 01 ab 92 0a 00
0020  00 01 03 03 03 03 08 00 61 ff 00 00 00 00 00 00
0030  00 00 00 3b 1c 10 ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0040  ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0050  ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0060  ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd ab cd
0070  ab cd ab cd ab cd
    
```

A continuación, hacemos un *ping* desde R1 a la interfaz *loopback* de R3 y en paralelo capturamos el tráfico que pasa por R2, tanto en la interfaz *fa0/0* como en la interfaz *fa0/1*.

Cuando capturamos en *fa0/0* tenemos el tráfico proveniente de R1 encapsulado, mientras que por *fa0/1* saldrá el tráfico desencapsulado.

Figura 59. Captura de tráfico *ping* entre CE1 y CE2 en el enrutador R2

```

* 20 17.851000 10.0.100.2 192.168.200.1 ICMP 118 Echo (ping) request id=0x0004, seq=0/0, ttl=254 (reply in 21)
* 21 17.902000 192.168.200.1 10.0.100.2 ICMP 114 Echo (ping) reply id=0x0004, seq=0/0, ttl=253 (request in 20)
> Frame 20: 118 bytes on wire (944 bits), 118 bytes captured (944 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: c2:01:f1:ec:00:00 (c2:01:f1:ec:00:00), Dst: c2:02:4c:f8:00:00 (c2:02:4c:f8:00:00)
> MultiProtocol Label Switching Header, Label: 17, Exp: 0, S: 1, TTL: 254
> Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.100.2, Dst: 192.168.200.1
> Internet Control Message Protocol

> Frame 21: 114 bytes on wire (912 bits), 114 bytes captured (912 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: c2:02:4c:f8:00:00 (c2:02:4c:f8:00:00), Dst: c2:01:f1:ec:00:00 (c2:01:f1:ec:00:00)
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.200.1, Dst: 10.0.100.2
> Internet Control Message Protocol
    
```

Anexo

1. Red digital de servicios integrados (RDSI)

El concepto red digital de servicios integrados surge a mediados de la década de los ochenta. La ITU-T (en aquellos momentos CCITT), en sus reuniones de 1984 y 1988, define la RDSI como una red basada en los siguientes aspectos:

- el compromiso internacional;
- la sustitución progresiva de la red telefónica tradicional;
- la complementación digital (extremo a extremo), y
- la integración de todos los servicios de telecomunicación presentes y futuros.

Según la ITU-T, la red digital de servicios integrados se define como una red evolucionada de la red de telefonía digital integrada que permite la conexión digital extremo a extremo para dar soporte a una amplia gama de servicios, a los que los usuarios pueden acceder mediante un conjunto limitado de terminales estándar multipropósito.

La RDSI define una arquitectura de protocolos que sólo especifica los protocolos de señalización, como el Q.921 y el Q.931, y los del nivel físico. No incluye ningún protocolo específico para el transporte de datos de usuario, ya que se puede utilizar cualquiera de los protocolos que ya existen.

La RDSI de banda estrecha pretende integrar todos los servicios que proporcionan las redes actuales: voz, paquetes, enlaces punto a punto, etc., pero no las LAN, ni la televisión. Para poder interconectar los terminales actuales se han diseñado unos **adaptadores de terminal** (TA).

Se puede establecer una equivalencia entre los niveles del modelo OSI y la arquitectura RDSI, tal y como se muestra en la figura 44:

- El nivel 1 define la interfaz física de los accesos básico (I.430) y primario (I.431).
- En el nivel 2 el protocolo que define las tramas es el LAPD (*link acces protocol D channel*). Está basado en la recomendación Q.921, que describe los procedimientos que aseguran la comunicación sin errores sobre el enlace

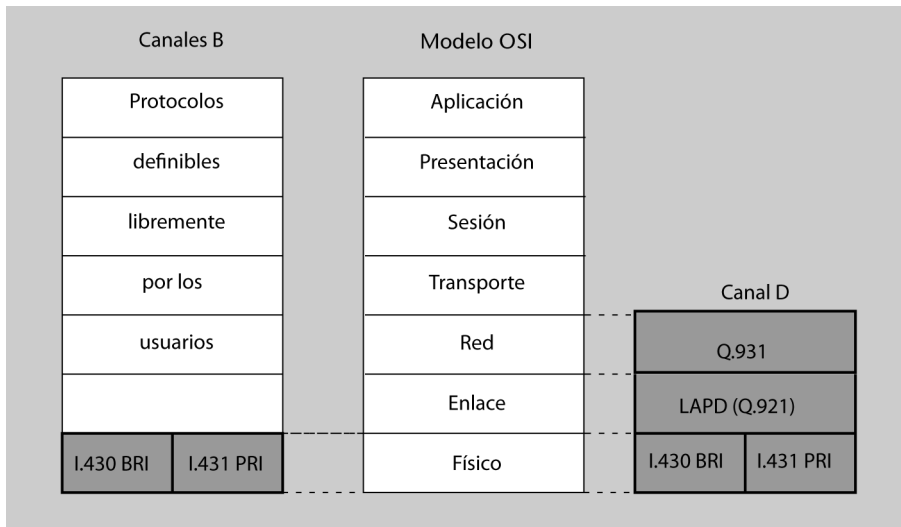
físico y define la conexión lógica entre el usuario y la red. En este nivel 2 diferenciamos entre el canal de señalización (canal D) y el de datos de usuario (canal B). Toda transmisión por el canal D se realiza con tramas LAPD, que se intercambian entre el equipo del abonado y el conmutador RDSI, independientemente del tipo de información.

- El protocolo de nivel 3 está basado en la recomendación Q.931, que especifica los procedimientos para establecer, mantener y finalizar las conexiones de los canales B, y la señalización de control entre el usuario y la red sobre el canal D.

LAPD


El protocolo de acceso a enlace por el canal D (LAPD) es el protocolo que describe las tramas en el nivel de enlace de datos.

Figura 60. Equivalencia entre los niveles del modelo OSI y la arquitectura RDSI



1.1. Arquitectura de la RDSI

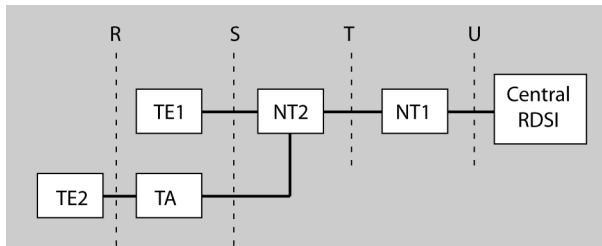
El acceso digital de usuario a la RDSI permite conectar diferentes tipos de terminales de usuario a la red mediante un acceso digital normalizado. Incluye las instalaciones de usuario y los equipos y líneas que unen al usuario al nodo de acceso.

La RDSI define cómo es la configuración de la interfaz entre usuario y red (UNI, *user to network interface*) y la estructura de acceso, es decir, cómo la red proporcionará al usuario el acceso a los diferentes servicios. 

La **configuración de referencia** del acceso de usuario a la red según la ITU-T se basa en dos conceptos:

- **Grupos funcionales**, o conjunto de funciones que son necesarias para acceder a la RDSI.
- **Puntos de referencia**, o interfaces de comunicación entre los diferentes grupos funcionales.

Figura 61. Configuración de referencia del acceso de usuario a la RDSI



1.1.1. Grupos funcionales

Se denominan grupos funcionales porque no describen ningún terminal específico, sino un conjunto genérico de equipos con sus funciones y responsabilidades. Los grupos funcionales definidos por la recomendación I.411 de la ITU-T son los siguientes:

- **NT1** (terminación de red 1). Se encuentra en casa del abonado y constituye la frontera entre la red pública y la privada. La puede controlar el proveedor de RDSI. Es el responsable de realizar las funciones de bajo nivel asociadas a la terminación física y eléctrica de la red (nivel 1 de OSI), que son: mantenimiento, sincronización, alimentación de potencia y multiplexación de las conexiones. Puede soportar múltiples dispositivos: teléfono, ordenador, alarma, etc. multiplexados.
- **NT2** (terminación de red 2). Equipo de usuario que realiza ciertas funciones de gestión interna del tráfico de usuario y del acceso a la red pública (niveles 2 y 3 de OSI), como son: señalización de los terminales, multiplexación de los canales de conversación y señalización, conmutación local, concentración del tráfico.
- **TE1** (equipo terminal 1). Periférico que integra los protocolos RDSI y que, por lo tanto, se puede conectar directamente a las interfaces S y T. Por ejemplo, el teléfono digital, el télex a 64 kbits/s, el facsímil del grupo 4 a 64 kbit/s.
- **TE2** (equipo terminal 2). Periférico que utiliza los actuales protocolos e interfaces no adaptados a la RDSI. Se conecta al bus pasivo de la RDSI mediante un adaptador de terminal en la interfaz R.
- **AT** (adaptador de terminal). Es el equipo que permite la conexión de los terminales NT2 (no RDSI) a la interfaz S (RDSI). Realiza las funciones de conversión de protocolos entre la interfaz R y la S. Por ejemplo, acopla el teléfono analógico o un terminal de datos con interfaz V.24 o V.35.

Ejemplo de equipo NT2

Un ejemplo de equipo NT2 es una central de conmutación (PBX, *private branch exchange*), o las redes de área local (LAN).

Ejemplo de equipo TE2


Un ejemplo de equipo TE2 es el teléfono analógico tradicional, los PC, los terminales de datos con interfaz V.24 o V.35.

1.1.2. Puntos de referencia

Los puntos de referencia son las interfaces de comunicación, que pueden ser físicas o lógicas, entre los grupos funcionales. La recomendación I.411 de la ITU-T define los puntos de referencia siguientes:

- **Punto de referencia R**, todos los protocolos o interfaces no compatibles de las series V y X, como el V.24, X.21, X.25, etc. Cada fabricante lo podría definir a su medida. Se halla, por lo tanto, entre el adaptador de terminal, AT, y el dispositivo no compatible, TE2.
- **Punto de referencia S**, punto de acceso universal a la RDSI, entre TE1 y NT2. Define el caudal y la estructura de canales útiles para el acceso a la RDSI. Sirve para cualquier terminal y para cualquier servicio. Puede coincidir, o incluir, el punto T. Es un bus pasivo en cuatro hilos de 1 km de longitud máxima y permite conectar hasta ocho terminales TE1 y AT, de manera que formen una pequeña red local. La velocidad de la trama básica es de 192 kbit/s y la velocidad neta es de 144 kbit/s.
- **Punto de referencia T**, interfaz entre NT1 y NT2. Si no existe NT2, se considera idéntico a S y se habla del punto S/T. Efectúa las funciones de alimentación, activación y desactivación de terminales, petición y permiso para acceder al canal de señalización para transmitir datos y la temporización de bits.
- **Punto de referencia U**, el utilizado en la misma línea que conecta al abonado con la central local RDSI (bucle de abonado). Adapta las señales de la red para enlazarlas en el bucle local, por lo tanto, pasa de dos a cuatro hilos.

1.2. Acceso de usuario a la RDSI

El medio por el cual se transmite la información y que utilizan los usuarios para interconectarse a la RDSI se denomina **canal**. Es una parte de la capacidad de transmisión que posee una interfaz. Los canales se combinarán en estructuras de interfaz que definirán la capacidad máxima de transmisión de la información. 

La recomendación I.421 de la ITU-T establece los siguientes tipos de canales:

- **Canal B**. Es el llamado canal de usuario. Es un canal *full-duplex* de 64 kbits/s que transporta información entre los usuarios y no contiene información de señalización.
- **Canal D**. Es un canal *full-duplex* que trabaja en 16 o 64 kbit/s que transporta la información de señalización entre el usuario y la red. Contiene la señalización para controlar las llamadas asociadas a los canales B. Utiliza la señaliza-

ción por canal común, ya que se utiliza un mismo canal para enviar la información de señalización de todos los canales B multiplexada estadísticamente sobre el mismo canal D. Asimismo, se puede utilizar para transmitir información de usuario en forma de paquetes a baja velocidad.

Por lo tanto, el acceso a la RDSI se realiza en los puntos de referencia S y T, los cuales deben ajustarse a unas estructuras de transmisión que se ofrecen al usuario como paquete. Estas estructuras son los accesos siguientes:


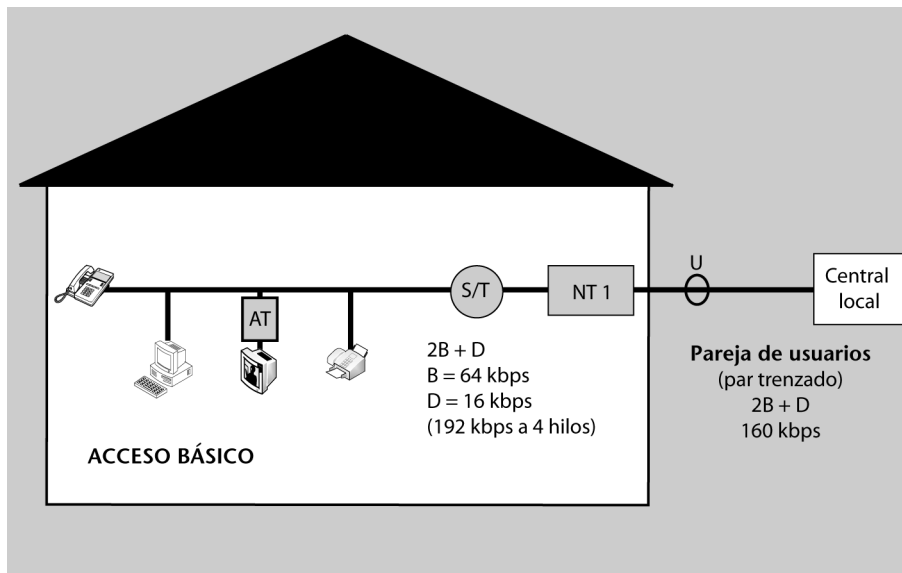
- **Acceso básico (BRI).** Este tipo de acceso está formado por dos canales B *full-duplex* de 64 kbit/s y un canal D *full-duplex* a 16 kbit/s (2B+D). La capacidad del acceso es de 144 kbits/s ($2 \times 64 \text{ kbits/s} + 16 \text{ kbits/s}$), no obstante es preciso añadir los bits de control, mantenimiento y sincronismo que provocan que la velocidad binaria total en el punto S sea de 192 kbit/s. Este servicio lo pueden soportar la mayoría de las líneas de abonado a dos hilos que existen. Intenta satisfacer las necesidades de la mayoría de usuarios particulares y pequeñas oficinas. Permite el uso simultáneo de voz y varias aplicaciones de datos, como pueden ser el acceso a conmutación de paquetes, el servicio de alarma, facsímil, videotexto, etc. Las especificaciones del acceso básico se encuentran en la recomendación I.430 de la ITU-T. 

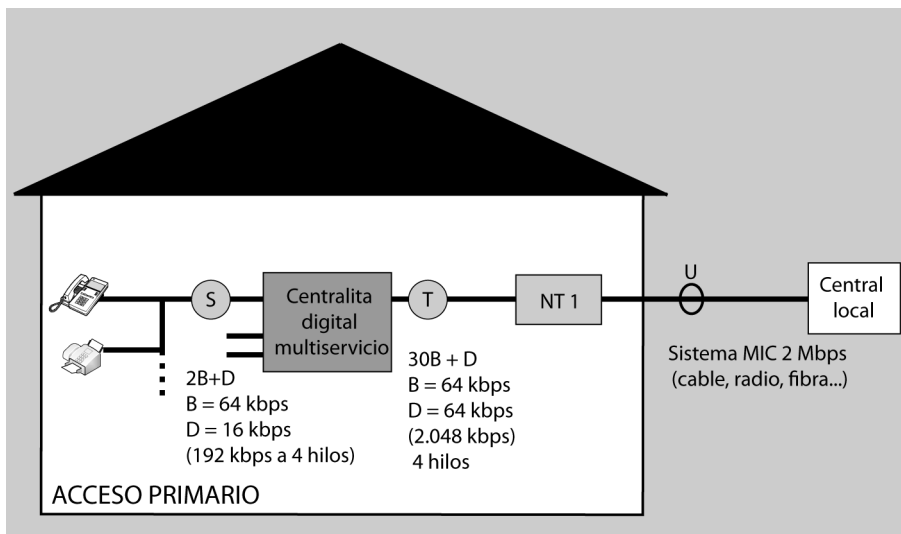
Figura 62. Acceso básico (BRI) a la RDSI



- Para la transmisión mediante el canal B se utiliza la multiplexación por división en el tiempo, donde cada TE tiene asignado un intervalo temporal en la trama. En cambio, en el canal D todos los TE conectados comparten el tráfico, tanto para transmitir señalización como para transmitir datos en modo paquete.
- **Acceso primario (PRI).** Está destinado a usuarios con necesidades de más capacidad de transmisión, como oficinas con PBX, LAN o bases de

datos. No existe un acuerdo en una única velocidad de transmisión de datos, vistas las diferentes jerarquías de transmisión digital. En Europa la velocidad estándar del acceso primario es de 2,048 Mbits/s de la trama E1. Está formado por 30 canales B *full-duplex* de 64 kbit/s y un canal D *full-duplex* de 64 kbit/s (30B+D). En Estados Unidos y Japón es un acceso 23B+D (T1), por lo tanto a una velocidad de 1,544 Mbits/s. Si el usuario necesita menos velocidad es posible utilizar estructuras intermedias (nB+D), que utilizan canales H (múltiplos de canales B). Las especificaciones del acceso primario se encuentran en la recomendación I.431 de la ITU-T. !

Figura 63. Acceso primario (PRI) a la RDSI



1.3. Protocolos de la RDSI

1.3.1. Nivel físico

El protocolo de nivel físico varía en las interfaces S y U. Está basado en las recomendaciones I.430 (BRI) y I.431 (PRI) de la ITU-T. Describe la conexión física entre el equipo terminal (TE) y el terminal de red 2 (NT2), por lo tanto, el punto de referencia S/T. Define el conector, las características eléctricas, la codificación de línea y el entramado. Es una conexión síncrona, serie y *full-duplex*. Los canales B y D son multiplexados en el tiempo sobre la misma línea en la misma trama, desde el NT1 en casa del abonado hasta la central telefónica local.

El **acceso básico** es una línea de usuario de dos hilos acabada con un NT1 con 1 a 8 TE multiplexados. La trama consta de lo siguiente:

- 48 bits que se repiten cada 250 μ s;
- velocidad de transmisión binaria de 192 kbit/s;
- canal D formado por 4 bits por trama distribuidos entre los canales B.

El **acceso primario** es un enlace con treinta y dos canales normalmente hacia una PBX que realiza las funciones de NT1 y NT2. La trama consta de lo siguiente:

- treinta y dos canales de 64 kbit/s, treinta canales B, un canal D y uno de sincronismo;
- velocidad de transmisión binaria de 2,048 Mbits/s;
- canal D con el mismo protocolo que en el acceso básico pero a más velocidad.

1.3.2. Nivel de enlace

Basado en la recomendación Q.921, el nivel de enlace describe los procedimientos que aseguran la comunicación sin errores sobre el enlace físico y define la conexión lógica entre el usuario y la red. El protocolo que define las tramas es el **LAPD**.

Sus funciones son las de cualquier protocolo de nivel 2 orientado a bit:

- Delimitación de las tramas, alineación y transparencia
- Control de la secuencia por medio de los campos N(s) y N(r)
- Detección y recuperación de errores en la conexión de datos
- Independiente del flujo de transmisión de bits del nivel 1
- Control de flujo

El LAPD realiza dos tipos de operaciones:

- **Operación sin reconocimiento.** Permite transferir información del nivel 3 con tramas no numeradas (sin reconocimiento). Este servicio no garantiza que la información llegue al destino, ni informa al emisor si la transmisión falla. No proporciona control de errores ni de flujo, sólo utiliza la detección de errores para descartar tramas erróneas. Se utiliza para la transmisión rápida de datos (por ejemplo, alarmas).

- **Operación con reconocimiento.** En este caso se establece una conexión lógica entre dos usuarios antes de producirse el intercambio de datos. La información de usuario se transmite con tramas con una secuencia reconocida. El protocolo incluye control de errores y de flujo.

El formato de trama de los dos tipos de operaciones es idéntico, con excepción del campo de direccionamiento.

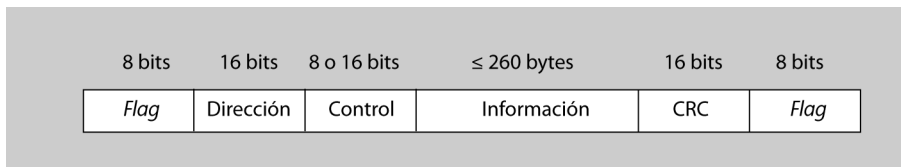
Formato de trama

Existen tres tipos de tramas que soportan los dos tipos de operaciones indicadas. Cada trama está delimitada al principio y al final con dos *flags* de 8 bits. También incluye un campo para la **corrección de errores** (CRC). El campo de **información** contiene los datos de nivel 3.


CRC

CRC son las siglas del código de redundancia cíclica utilizado para la detección de errores en la trama.

Figura 64. Estructura de la trama LAPD



Las características principales se encuentran en los campos de dirección y de control:

- **Campo de dirección.** Para entender el direccionamiento es necesario tener en cuenta que el LAPD utiliza dos niveles de multiplexación: 
 - Nivel de abonado: varios dispositivos de usuario pueden compartir la misma interfaz física.
 - Nivel de dispositivo: en cada dispositivo de usuario pueden darse diferentes tipos de tráfico (paquetes, señalización, etc.).

Para tratarlos, el LAPD posee el campo de dirección formado por dos identificadores:

Dirección = TEI + SAPI

- **Identificador de punto final de terminal (TEI):** identifica el terminal de usuario. Normalmente este valor lo asigna dinámicamente la RDSI cuando recibe una petición de conexión del terminal. Todos los terminales del mismo bus deben tener un TEI diferente.
- **Identificador de punto de acceso al servicio (SAPI):** identifica el punto de acceso al servicio por parte de la red y del usuario de la interfaz UNI, e identifica el tipo de tráfico.

- **Campo de control.** Identifica el tipo de trama. Existen tres tipos:

- **Tramas de información (I).** Se utilizan para transmitir la información del nivel de red. Se utilizan los campos de número de secuencia de emisión y de recepción para poder efectuar el control de las tramas y de flujo y mantener el orden de las tramas en el enlace de datos.
- **Tramas de supervisión (S).** Se utilizan para controlar el estado del enlace de datos. Realizan funciones como señalar la recepción de una trama fuera de secuencia, contestar tramas de información recibidas, realizar sondeos en el otro extremo y responderlos. Lo son: *receiver ready* (RR), *receiver not ready* (RNR) y *reject* (REJ).
- **Tramas no numeradas (U).** Se utilizan para iniciar y cerrar los canales lógicos del nivel de enlace. Por ejemplo: conexión en modo sincronismo equilibrado (SABME), desconexión (DISC), indicación de recepción (UA), etc.

1.3.3. Nivel de red

En este nivel no se define ningún protocolo específico para el intercambio de datos de usuario, de manera que se puede utilizar cualquier tipo de protocolo por el canal B, como es el IP. Por otra parte, la recomendación Q.931 especifica los procedimientos para establecer, mantener y finalizar las conexiones en los canales B y la señalización de control de usuario a usuario sobre el canal D. Para ello debe llevar a cabo, entre otras funciones, el control de conexión de la red, el intercambio de información entre el usuario y la red, el control de flujo y congestión, la detección y la recuperación de errores, y el control de la llamada.

1.3.4. SS7 (sistema de señalización n.º 7)

El sistema de señalización por canal común n.º 7 es un protocolo de señalización definido por la ITU-T que utilizan las redes de telefonía públicas. Este sistema define los procedimientos para inicializar a través de una red paralela a la red de datos y gestionar las llamadas telefónicas mediante una red paralela a la red de datos, de manera que la señalización no tenga que viajar por la misma red por donde se transmite la llamada telefónica, tanto si es analógica como si es digital. Estas funciones las realiza intercambiando mensajes entre los diferentes componentes del sistema. Su funcionamiento está optimizado para canales dúplex de transmisión digital de 64 kbit/s.

Como las funciones y requisitos para la red de señalización son ligeramente diferentes en la interfaz UNI y en los puntos intermedios de la red, la arquitectura de los protocolos de señalización es diferente en la interfaz UNI y en la

NNI. En la interfaz UNI se utiliza el protocolo Q.931, mientras que en la interfaz NNI se utiliza el SS7.

Así, cuando el usuario quiere realizar una llamada, en la fase de establecimiento de la conexión se intercambiarán unos cuantos mensajes Q.931 con el nodo de acceso a la RDSI. Este nodo de acceso convertirá estos mensajes Q.931 en mensajes SS7 que encaminará mediante la RDSI hacia el nodo de salida.

1.4. Servicios de la RDSI

Las recomendaciones de la serie I.200 de la ITU-T, conocidas como capacidades de servicio, clasifican y describen los servicios que debe permitir la RDSI. Se pueden estructurar en tres categorías:

1) **Servicios básicos o portadores.** Los servicios portadores permiten el acceso a la red básica y transferir información entre usuarios mediante una interfaz normalizada. Existen dos tipos:

a) **Conmutación de circuitos por el canal B.** Estos servicios proporcionan los medios para transmitir información entre usuarios en tiempo real y sin alterar el contenido del mensaje, independientemente del contenido y aplicación. El canal B se utiliza para la transmisión de los datos de usuario de extremo a extremo. Los usuarios pueden utilizar cualquier protocolo para comunicarse. Son servicios caracterizados porque toda la señalización de establecimiento, control y liberación de un canal digital se efectúa por el canal D. Los servicios están estructurados en 8 kHz, ello indica que, además de los bits de información, se pasa información de reloj a 8 kHz que delimita los datos en unidades de 8 bits.

b) **Conmutación de paquetes sobre canal B y D.** Estos otros servicios portadores se caracterizan por poseer funciones de tratamiento de información estructurada en paquetes. La información de señalización de establecimiento, control y liberación de un canal digital se efectúa tanto por el canal D, como por el canal B, subdividiéndolo en diferentes canales lógicos. Se utiliza para aquellas aplicaciones a las cuales no les afecte el retardo, como sería la transferencia de ficheros.

2) **Teleservicios o servicios de valor añadido.** Son servicios que utilizan los servicios portadores e implementan niveles superiores. Se ofrecen en la interfaz usuario terminal y no en S/T. Los pueden ofrecer tanto las operadoras, como terceras compañías. La recomendación I.212 define algunos de estos servicios, como son el videotexto, el facsímil, la telefonía digitalizada, etc.

3) **Servicios suplementarios.** Estos servicios modifican o complementan un determinado servicio de valor añadido a fin de que ofrezca otras funciones que

ya tiene la red. Existen muchos servicios suplementarios disponibles, entre los cuales se encuentra la identificación de la llamada entrante, la multiconferencia, el redireccionamiento de llamadas, la información de tarificación, etc.

Resumen

En este módulo hemos visto los conceptos básicos de diferentes sistemas de comunicaciones que se utilizan actualmente.

Hemos empezado viendo diferentes conceptos relacionados con las redes de comunicaciones, y más concretamente las redes de gran alcance, como son los tipos de conmutación, centrándonos o bien en las redes de conmutación de paquetes o bien en las técnicas de encaminamiento.

En los siguientes puntos hemos tratado de explicar las principales redes WAN que se utilizan actualmente, desarrolladas por orden cronológico. De esta manera hemos empezado mostrando el concepto de red telefónica conmutada y su evolución desde la red de conmutación de circuitos analógica hasta la actualidad, pasando por su digitalización hasta el bucle de abonado, para acabar en la tecnología sobre la misma línea de abonado (DSL).

Posteriormente, hemos expuesto la red de conmutación de paquetes más utilizada hoy, el *frame relay*, y hemos analizado los protocolos y la gestión que realiza del tráfico.

Se ha explicado la red ATM, un primer paso para combinar la simplicidad de la conmutación de circuitos con la flexibilidad de paquetes, al mismo tiempo que se intenta ajustar la red a las necesidades del tráfico en cada momento.

En cuanto a la red troncal de las operadoras e internet, se han explicado las características principales del protocolo MPLS. Se ha justificado la motivación de esta tecnología y los elementos clave para su funcionamiento.

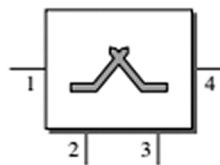
Actividades

1. Averiguad el funcionamiento de los protocolos que se utilizan para el control de flujo y de errores en el nivel del enlace de datos: parada y espera (*stop and wait*), *go back N* y ARQ con repetición selectiva.
2. Teniendo en cuenta el esquema de la red de la figura 18, debéis obtener las tablas de enrutamiento correspondientes a los nodos 4, 5 y 6, aplicando el criterio del camino más corto y teniendo en cuenta las tablas de los otros tres nodos.
3. Teniendo en cuenta las características de la trama E1, descritas en la recomendación ITU-T G.732, comprobad que la velocidad de transmisión del sistema es de 2.048 kbit/s.
4. Explicad los diferentes tipos de acceso de usuario a la RDSI que existen y qué canales utiliza.
5. Comentad las principales diferencias en el nivel de enlace entre X.25 y *frame relay*.
6. Comparad la velocidad de acceso y el CIR en *frame relay*. ¿Qué función tienen en la gestión del tráfico?
7. Buscad cuál es la función del puntero dentro de la cabecera de la celda ATM.
8. Describid los mecanismos de formación de las normas SONET y SDH. Explicad la relación entre ellas.
9. Comentad el mecanismo de identificación de un circuito virtual mediante una red ATM.

Ejercicios de autoevaluación

1. Según la longitud del paquete hemos observado que varía el tiempo necesario de transmisión. Queremos calcular cuál es la mejor longitud del paquete, a fin de que la transmisión sea la más rápida posible, si queremos enviar un mensaje de 48 *bytes* mediante una red de paquetes. Supongamos que entre el terminal origen y el de destino los paquetes atraviesan dos nodos, y que la cabecera de control es de 4 *bytes*. Calculad qué diferencia de tiempo se daría si se utilizaran paquetes de 48 *bytes* de datos, de 16 *bytes* y de 6 *bytes*.
2. Calculad el tiempo de transmisión de un mensaje de $M = 128$ *bytes* por medio de un enlace formado por $N = 5$ nodos con tiempo de propagación en los enlaces $T_p = 5$ ms y velocidad de transmisión de los nodos $v_t = 64$ kbits/s. Realizad el cálculo para los dos modelos de redes que se indican:
 - a) Una red de conmutación de circuitos con tiempo de conmutación en los nodos negligible.
 - b) Una red de conmutación de paquetes en modo datagrama.
 - Tamaño de los paquetes, $P = 16$ *bytes*.
 - Tiempo de espera en las colas negligible.
3. En la figura siguiente se muestra una red basada en circuito virtual:

Incoming		Outgoing	
Port	VCI	Port	VCI
1	14	3	22
2	71	4	41
2	92	1	45
3	58	2	43
3	78	2	70
4	56	3	11



Indicad el puerto de salida y el VCI para los paquetes de entrada siguientes:

- a) Paquete 1: 3, 78
- b) Paquete 2: 2, 92
- c) Paquete 3: 4, 56
- d) Paquete 4: 2, 72

Donde el primer número es el puerto de entrada y el segundo es el VCI de entrada.

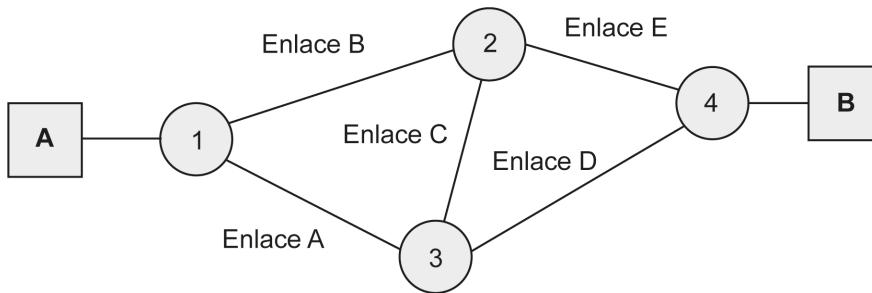
4. Considerad una red de conmutación con las características siguientes:
 - 5 nodos
 - velocidad de transmisión de cada enlace = 9.600 bps

- paquetes de 1.040 bits con cabeceras de 16 bits
- tiempo de propagación de cada enlace = 10 ms
- tiempo de proceso de cada nodo = 1 ms
- tiempo de establecimiento de llamada = 200 ms

Se pide calcular el tiempo necesario para transmitir un fichero de 8.192 bits (desde que sale el primer bit del primer nodo hasta que sale el último bit del último nodo) usando:

- red de conmutación de circuitos
- red de conmutación de mensajes
- red de conmutación de paquetes

5. El dibujo siguiente representa una parte de una red de conmutación de paquetes de tipo datagrama.



En esta red se quiere transmitir un fichero de 220.000 bytes desde el punto A hasta el punto B. Los paquetes son de 1.024 bytes de longitud total, con cabeceras de 24 bytes.

En el momento de enviar el fichero, la ruta que siguen los paquetes es a través de los nodos 1, 3 y 4. Al cabo de 2 segundos, y debido a un problema detectado en el enlace A, la red decide cambiar a la ruta constituida por los nodos 1, 2, 3 y 4.

Suponed que los nodos de la red solo tienen espacio para un paquete. Considerad que el nodo 1 tiene un tiempo de proceso negligible, el nodo 2 de 50 ms, el nodo 3 de 20 ms y el nodo 4 de 10 ms, y que el tiempo de transferencia empieza en el nodo 1 a partir de la transmisión del primer bit, y acaba en el nodo 4 con el procesamiento del último bit.

Características de la red:

Enlace	Velocidad de transmisión	Velocidad de propagación	Distancia (km)
A	2.048 kbps	2×10^8 m/s	100
B	256 kbps	2×10^8 m/s	100
C	128 kbps	2×10^8 m/s	100
D	8.192 kbps	3×10^8 m/s	72.000
E	2.048 kbps	2×10^8 m/s	1.500

Se pide que calculéis:

- El tiempo de propagación y de transmisión de un paquete en cada enlace.
- La cadencia máxima posible para cada una de las rutas.
- El número de paquetes que se transmitirán por cada ruta.
- El tiempo total de transferencia del fichero.

Nota: en el ejercicio la cadencia de proceso en un nodo se define como:

$$\lambda_{\text{nodo}} = \frac{1}{\text{Tiempo de proceso de un paquete}}$$

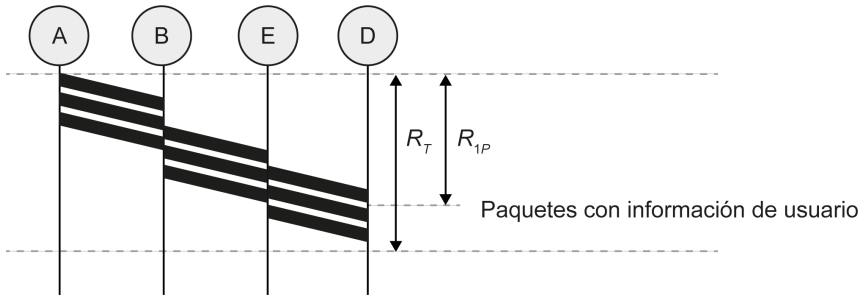
La cadencia de transmisión de un enlace (en paquetes/s) es:

$$\lambda_{\text{enlace}} = \frac{1}{\text{Tiempo de transmisión de un paquete}}$$

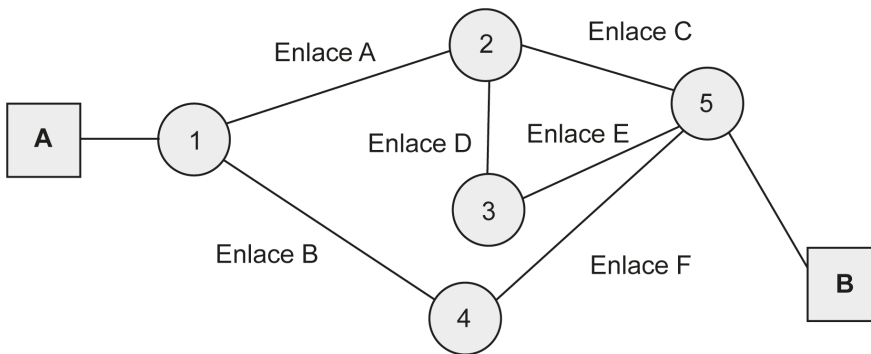
La cadencia de la ruta es:

$$\lambda_{\text{ruta}} = \min(\lambda_{\text{enlace}}, \lambda_{\text{nodo}})$$

Según la figura, el tiempo total de transmisión, que denominamos R_T , y el tiempo de transmisión del primer paquete, que denominamos R_{1P} , se relacionan con la cadencia de la ruta y con el número de paquetes, N_{paq} , con la fórmula siguiente:



6. En la siguiente red de conmutación de paquetes de tipo datagrama se quiere transmitir un mensaje de 14.112 bytes desde una fuente A, que genera bits a 64 kbps, hasta un destino B. Todos los medios de transmisión son coaxiales con velocidad de propagación $v_{\text{prop}} = 200.000 \text{ km/s}$. Todos los nodos tienen tiempos de proceso de 10 ms.

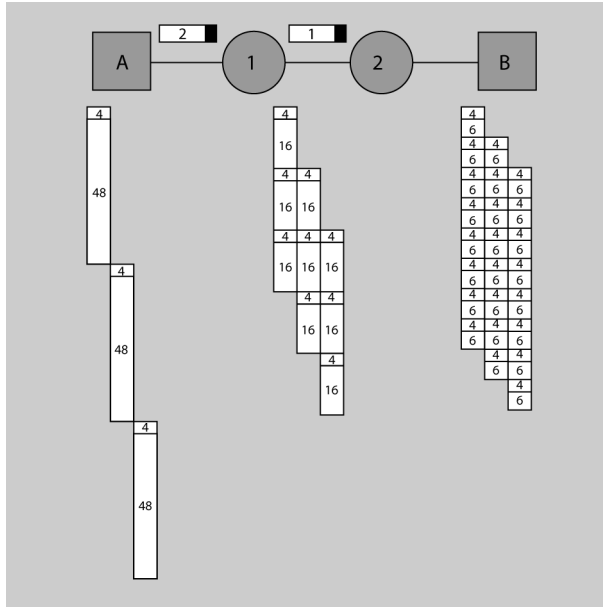


Enlace	Velocidad de transmisión	Velocidad de propagación	Distancia (km)
A	256 kbps	$2 \times 10^8 \text{ m/s}$	1400
B	512 kbps	$2 \times 10^8 \text{ m/s}$	1000
C	256 kbps	$2 \times 10^8 \text{ m/s}$	200
D	1.024 kbps	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	800
E	2.048 kbps	$2 \times 10^8 \text{ m/s}$	5.000
F	128 kbps	$2 \times 10^8 \text{ m/s}$	600

Si los paquetes tienen una longitud de 256 bytes, de los cuales 32 bytes son de cabecera, ¿cuál de las tres rutas posibles entre A y B es la óptima en cuanto al retardo total de transmisión del mensaje?

Solucionario

1. La longitud del paquete se va reduciendo; sin embargo, la longitud de la cabecera se mantiene siempre con una longitud de 4 bytes, de manera que si reducimos mucho la longitud de los paquetes acabará aumentando el tiempo de transmisión. Calculamos el tiempo que tardará en transmitirse la información suponiendo que no exista retardo en los nodos intermedios.



- a) Para paquetes de 48 bytes, el tiempo de transmisión será $(48 + 4) \times 3 = 156$ veces el tiempo de transmisión de un byte.
- b) Para paquetes de 16 bytes, el tiempo de transmisión será $(16 + 4) \times 5 = 100$ veces el tiempo de transmisión de un byte.
- c) Para paquetes de 6 bytes, el tiempo de transmisión será $(6 + 4) \times 10 = 100$ veces el tiempo de transmisión de un byte.

Existe una longitud de paquete que efectúa la transmisión óptima, que estaría entre los paquetes de 6 bytes y 16 bytes. Se obtendría de buscar el valor N que nos convierta en mínima la expresión siguiente:

$$\frac{d}{dN} \left[(N + 4) \left(\frac{48}{N} + 2 \right) \right] = 0$$

El valor que minimiza el tiempo de transmisión es $N = 9$.

2. Calculamos el tiempo de transmisión para los dos supuestos:

a) Una red de conmutación de circuitos. Primero se ha de establecer el circuito y después se transmiten los datos, por lo tanto:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{establecimiento}} + T_{\text{transmisión}} = [(N - 1) \cdot T_p] \cdot 2 + \left[(N - 1) \cdot T_p + \frac{M}{v_t} \right]$$

$$T_{\text{Total}} = [(5 - 1) \cdot 5 \text{ ms}] \cdot 2 + \left[(5 - 1) \cdot 5 \text{ ms} + \frac{128}{64 \text{ kbps}} \right] = 40 + 22 = 62 \text{ ms.}$$

b) Una red de conmutación de paquetes en modo datagrama. Sólo debemos tener en cuenta la transmisión de los datos, por lo tanto:

$$T_{\text{Total}} = T_{\text{paquete}_i} + T_{\text{nodos}} + T_{\text{transmisión}} = (N - 1) \cdot T_p + (N - 2) \cdot \frac{P}{v_t} + \frac{M}{v_t}$$

$$T_{\text{Total}} = (5 - 1) \cdot 5 \text{ ms} + (5 - 2) \cdot \frac{16}{64 \text{ kbps}} + \frac{128}{64 \text{ kbps}} = 20 + 0,75 + 2 = 22,75 \text{ ms.}$$

3. El puerto de salida y el VCI son, respectivamente:

- a) Paquete 1: 2, 70

- b) Paquete 2: 3, 11
 c) Paquete 3: 1, 45
 d) Paquete 4: 4, 41

4. Para la red de conmutación de circuitos:

$$T_T = T_{\text{establecimiento}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{transmisión}} = 0,2 + 4 \times 0,01 + \frac{8.192}{9.600} = 1.093,33 \text{ ms}$$

Para la red de conmutación de mensajes:

$$T_T = 4 \cdot T_{\text{prop}} + 4 \cdot T_{\text{proc}} + 4 \cdot T_{\text{trans}} = 4 \cdot (0,01 + 0,01 + \frac{8.192}{9.600}) = 3.457,33 \text{ ms}$$

Para la red de conmutación de paquetes:

$$T_T = R_{\text{paquete1}} + \frac{N_{\text{paquetes}} - 1}{\lambda}$$

$$T_{Tx} = \frac{1.040}{9.600} \text{ s}$$

$$N_{\text{paquetes}} = \frac{8.192}{1.440 - 16} \text{ paquetes}$$

$$\lambda = \min\left(\frac{1}{T_{Tx}}, \frac{1}{T_{\text{proc}}}\right) = 9,23 \frac{\text{paquetes}}{\text{s}}$$

$$R_{\text{paquete1}} = 4 T_{\text{prop}} + 4 T_{\text{proc}} + 4 T_{Tx} = 477,33 \text{ ms}$$

$$T_T = 1.235,72 \text{ ms}$$

5. En un paquete hay $1.024 - 24 = 1.000$ bytes. El número de paquetes que hay que enviar es:

$$220.000 \text{ bytes} / 1.000 \text{ bytes/paquete} = 220 \text{ paquetes.}$$

El tiempo de transmisión de un paquete es: $1.024 \text{ bytes} \times 8 \text{ bits/byte} / V_{\text{transmisión}}$

El tiempo de propagación es: $\text{distancia (km)} \times 1.000 / V_{\text{propagación}}$

La cadencia del enlace es: $1 / T_{\text{Transmisión}}$

La cadencia del nodo es: $1 / T_{\text{proc}}$

Enlace	Tiempo de transmisión (ms)	Tiempo de propagación (ms)	I (paquetes/s)
A	4	0,5	250
B	32	0,5	31,25
C	64	0.5	15.625
D	1	240	1.000
E	4	7,5	250

Nodo	T _{proc} (ms)	I (paquetes/s)
1		
2	50	20
3	20	50
4	10	100

La cadencia para cada una de las rutas es el mínimo de la I de nodos y enlaces de la ruta.

Ruta 1: 1 - A - 3 - D - 4 $\lambda = 50$ paquetes/s

Ruta 2: 1 - B - 2 - C - 3 - D - 4 $\lambda = 15,625$ paquetes/s

Después de 2 segundos, por la ruta 1 han pasado 2×50 paquetes = 100 paquetes. Por la ruta 2 pasarán $220 - 100 = 120$ paquetes.

$$T_T = 2 + T_{120}$$

$$T_T = 2 + T_{\text{primer paquete ruta 2}} + \frac{119}{\lambda_{\text{ruta 2}}}$$

$$T_{\text{primer paquete ruta 2}} = 418 \text{ ms}$$

$$T_T = 10,034 \text{ s}$$

6. La fuente genera $64 \times 1.000 / (256 - 32) \times 8 = 35,71$ paq/s. El tiempo de transmisión de cada paquete es 27,34 ms. Los nodos procesan $1/0,01 = 100$ paq/s.

Enlace	T _{prop} (ms)	T _{transmisión}	λ _{enlace} (paq/s)
A	7	8	125
B	5	4	250
C	1	8	125
D	4	2	500
E	25	1	1000
F	3	16	62,25

En las tres rutas la cadencia será: 35,71 paq/s, y por lo tanto será óptima la que tenga menos retardo en el primer paquete.

Ruta 1:

$$R_i = T_{\text{tx fuente}} + T_{\text{proc 1}} + T_{\text{prop A}} + T_{\text{Tx A}} + T_{\text{proc 2}} + T_{\text{prop C}} + T_{\text{Tx C}} + T_{\text{proc 5}} + T_{\text{Tx destino}} = 0,110 \text{ s}$$

Ruta 2:

$$R_i = T_{\text{tx fuente}} + T_{\text{proc 1}} + T_{\text{prop A}} + T_{\text{Tx A}} + T_{\text{proc 2}} + T_{\text{prop D}} + T_{\text{Tx D}} + T_{\text{proc 3}} + T_{\text{prop E}} + T_{\text{Tx E}} + T_{\text{proc 5}} + T_{\text{Tx destino}} = 0,148 \text{ s}$$

Ruta 3:

$$R_i = T_{\text{tx fuente}} + T_{\text{proc 1}} + T_{\text{prop B}} + T_{\text{Tx B}} + T_{\text{proc 4}} + T_{\text{prop F}} + T_{\text{Tx F}} + T_{\text{proc 5}} + T_{\text{Tx destino}} = 0,117 \text{ s}$$

La ruta óptima es la ruta 1 para A y C.

Glosario

AAL m Véase *ATM adaptation layer*.

adaptador de terminal m Dispositivo que proporciona compatibilidad RDSI a los equipos que no son RDSI.
sigla TA

add-drop multiplexer m Equipo multiplexor que permite insertar y extraer tributarios de una red SDH.
sigla ADM

ADM m Véase *add-drop multiplexer*.

asynchronous transfer modo m Modo de transferencia asíncrono.
sigla ATM

ATM m Véase *asynchronous transfer modo*.

ATM adaptation layer m Capa de adaptación ATM que permite registrar diferentes protocolos sobre ATM.
sigla AAL

available bit rate *m* Clase de servicio ATM en el que la red controla la velocidad de transferencia del emisor mediante celdas de gestión.
sigla ABR

ABR *m* Véase *available bit rate*.

ADSL *f* Véase *línea de abonado digital asimétrica*.

backward explicit congestion notification *m* Bit activado por la red *frame relay* que informa al emisor de que hay congestión en el camino del origen al destino.
sigla BECN

BECN *m* Véase *backward explicit congestion notification*.

basic rate interface *m* Acceso básico RDSI que utiliza dos canales B y un canal D.
sigla BRI

BRI *m* Véase *basic rate interface*.

bloqueo *m* Situación que experimentan las redes de conmutación cuando una conexión no se puede establecer porque no están disponibles todos los recursos necesarios.

CIR *f* Véase *committed information rate*.

circuito virtual *m* Enlace de comunicaciones, de voz o de datos que el usuario ve como un circuito punto a punto dedicado. Un circuito virtual se corresponde con un camino lógico, no físico.
sigla VC

committed information rate *f* Velocidad media de bits por segundo que la red acepta soportar para una determinada conexión.
sigla CIR

congestión *f* Caída del rendimiento de una red provocada por la entrada de paquetes por encima de la capacidad de la red.

cyclic redundante code *f* Código de redundancia cíclica por detección de errores.
sigla CRC

CRC *f* Véase *cyclic redundante code*.

data communications equipment *m* Dispositivo de conmutación de la red *Frame relay* o X.25 y que pertenece a la red.
sigla DCE

data link channel identifier *m* Valor único que se asigna en el extremo de un PVC en una red *Frame relay*. Este valor identifica un extremo de un PVC particular en un canal de acceso de usuario en una red *Frame relay* y sólo tiene significado local.
sigla DLCI

data terminal equipment *m* Dispositivo final de transmisión o recepción de datos en una red *Frame relay* o X.25. Es el dispositivo de usuario.
sigla DTE

datagrama *m* Paquete que no sigue ningún camino prefijado por dentro de la red y, por lo tanto, es necesario tomar una decisión de encaminamiento para este paquete en cada nodo que atraviesa.

DCE *m* Véase *data communications equipment*.

DLCI *m* Véase *data link channel identifier*.

DTE *m* Véase *data terminal equipment*.

encaminamiento *m* Decisión sobre el camino que seguirá un paquete, desde el origen hasta el destino, a través de una red de conmutación.

FECN *m* Véase *forward explicit congestion notification*.

forward explicit congestion notification *m* Bit activado por la red *Frame relay* que informa en el DTE receptor de que hay congestión en el camino del origen al destino.
sigla FECN

frame relay *m* Tecnología WAN basada en conmutación de paquetes y circuitos virtuales.

HDLC *m* Véase *high level data link control*.

high level data link control *m* Protocolo de comunicaciones genérico de nivel de enlace desarrollado por la organización ISO.
sigla HDLC

International Telecommunication Union - Telecommunications Organismo de estandarizaciones que propone recomendaciones para las comunicaciones internacionales. Anteriormente, este organismo se llamaba Comité Consultif International Telegraphique Téléphonique (CCITT).
sigla ITU-T

línea de abonado digital asimétrica *f* Tecnología que permite utilizar el bucle de abonado de la red telefónica convencional para acceder a redes de datos de alta velocidad.
sigla ADSL

LAN *f* Véase *red de área local*.

LAPB *f* Véase *link access procedure balanced*.

LAPD *m* Véase *link access procedure on the D channel*.

link access procedure balanced *f* Protocolo de la capa de enlace de las redes X.25, que deriva de HDLC.
sigla LAPB

link access procedure on the D channel *m* Protocolo de la capa de enlace RDSI por el canal D. Se utiliza para transmitir la señalización de la RDSI.
sigla LAPD

network to network interface *f* Interfaz entre dos conmutadores ATM.
sigla NNI

NNI *f* Véase *network to network interface*.

nodo *m* Dispositivo multiplexor encargado de encaminar los datos hacia el destino.

open systems interconnection *m* Modelo de comunicación entre dispositivos. Define una arquitectura de siete niveles de funciones de comunicación.
sigla OSI

OSI *m* Véase *open systems interconnection*.

paquete *m* Conjunto de *bytes* que circulan por una red de conmutación como una unidad. Se compone de dos partes: cabecera y datos de usuario.

PBX *m* Véase *private branch exchange*.

PDH *f* Véase *plesiochronous digital hierarchy*.

permanent virtual circuit *m* Enlace lógico cuyo origen, destino y tipo de servicio han sido definidos por el administrador de la red.
sigla PVC

plesiochronous digital hierarchy *f* Jerarquía digital plesiócrona en la que se basa la RDSI.
sigla PDH

PRI *m* Véase *primary rate interface*.

primary rate interface *m* Acceso primario RDSI.
sigla PRI

private branch exchange *m* Conmutador de telefonía analógica o digital situado en casa del abonado y utilizado para conectar redes de telefonía públicas y privadas.
sigla PBX

PVC *m* Véase *permanent virtual circuit*.

QoS *f* Véase *quality of service*.

quality of service *f* Descripción de la calidad de una conexión.
sigla QoS

red de área local *f* Red que permite interconectar estaciones próximas físicamente.
sigla LAN

red de gran alcance *f* Red que permite interconectar estaciones que no están próximas físicamente.
sigla WAN

red digital de servicios integrados *f* Red de conmutación de circuitos completamente digitalizada que ofrece servicios de voz y datos.

RDSI *f* Véase *red digital de servicios integrados*.

SDH *f* Véase *synchronous digital hierarchy*.

signalling system number 7 *m* Protocolo de señalización utilizado en la interfaz NNI, es decir, entre los nodos internos de una red pública.
sigla SS7

SON *f* Véase *synchronous optical network*.

SS7 *m* Véase *signalling system number 7*.

SVC *m* Véase *switched virtual circuit*.

switched virtual circuit *f* Conexión de circuito virtual establecida en la red bajo la demanda del usuario.
sigla SVC

synchronous digital hierarchy *f* Jerarquía digital síncrona.
sigla SDH

synchronous optical network *f* Especificación ANSI compatible con SDH, utilizada en EE.UU.
sigla SON

TA *m* Véase *adaptador de terminal*.

unspecified bit rate *f* Clase de servicio *ATM best effort* que no especifica parámetros de calidad de servicio.
sigla UBR

UBR *f* Véase *unspecified bit rate*.

UPC *m* Véase *usage parameter control*.

usage parameter control *m* Función ATM que se encarga de monitorizar el cumplimiento del contrato de tránsito por el usuario.
sigla UPC

user to network interface *f* Interfaz entre el usuario y la red.
sigla UNI

UNI *f* Véase *user to network interface*.

variable bit rate *f* Clase de servicio ATM para aplicaciones de velocidad variable y con requisitos de sincronización entre emisor y receptor.
sigla VBR

VBR *f* Véase *variable bit rate*.

VC¹ *m* Véase **circuito virtual**.

VC² *m* Véase **virtual channel**.

virtual channel *f* Describe un flujo unidireccional de celdas ATM con el mismo identificador de canal virtual.
sigla VC

VC *f* Véase **virtual channel**.

virtual path *m* Describe un flujo unidireccional de celdas ATM que pertenecen a un grupo de VC y que tienen el mismo identificador de trayecto virtual.
sigla VP

VP *m* Véase **virtual path**.

WAN *f* Véase **red de gran alcance**.

X.25 *f* Tecnología WAN basada en conmutación de paquetes y circuitos virtuales, predecesora de la tecnología *Frame relay*.

Bibliografía

Black, U. (1997). *Tecnologías emergentes para redes de computadoras* (2.^a ed.). México, DF: Prentice Hall.

Caballero, J. M. (1998). *Redes de banda ancha*. Barcelona: Marcombo.

Freeman, R. L. (1999). *Fundamentals of Telecommunications*. Nueva York: John Wiley and Sons.

Forouzan, A. (2013). *Data Communications and Networking* (5.^a ed.). McGraw-Hill.

Halsall, F. (1998). *Comunicación de datos, redes de computadores y sistemas abiertos* (4.^a ed.). México, DF: Addison-Wesley.

Stallings, W. (1998). *ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM* (4.^a ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

Stallings, W. (2004). *Redes e Internet de alta velocidad. Rendimiento i calidad de servicio* (2.^a ed.). Madrid: Pearson / Prentice Hall.

Stallings, W. (2014). *Data and Computer Communication* (10.^a ed.). Pearson Education.

Tanenbaum, A. S. (2011). *Computer Networks* (5.^a ed.). Prentice Hall.