

7. Capítulo 7: Redes LAN: topología y arquitectura de protocolos

En este capítulo se desarrollan conceptos referidos a las redes de área local (LAN). Mientras las redes de área amplia pueden ser públicas o privadas, las LAN generalmente son propiedad de la organización que utiliza la red para interconectar equipos. Las LAN's tienen mucha mayor capacidad de transportar datos que las redes de área amplia.

Es el momento de desarrollar las distintas topologías, examinar el modelo 802 y analizar con detenimiento la norma Ethernet, la cual representa el protocolo para usuarios finales más usado en el mundo.

7.1. Topologías en redes LAN

En el contexto de una red de comunicación, el término topología se refiere a la forma en la que los puntos finales o estaciones conectadas a la red, se interconectan unos con otros.

Históricamente, las topologías comunes para LAN son bus, árbol, anillo y estrella. En la actualidad la topología en estrella, basada en el uso de conmutadores, es la topología dominante. Sin embargo, es útil observar brevemente el funcionamiento de la topología bus porque comparte algunas características con las LAN's inalámbricas.

7.1.1. Topología Bus

Se caracteriza por el uso de un medio multipunto o bus (cable conductor) al que todas las estaciones se encuentran directamente conectadas mediante interfaces físicas apropiadas conocidas como tomas de conexión o taps. Entre la estación y la toma de conexión hay un cable conductor que permite la transmisión y recepción de datos a través de (y desde) el bus. Una transmisión desde cualquier estación se propaga a través del medio en ambos sentidos y es recibida por el resto de estaciones. En cada extremo del bus existe un terminador que es una resistencia que absorbe las señales, eliminándolas del bus. Existen dos problemas en esta disposición:

- Dado que la transmisión desde una estación se puede recibir en las demás estaciones, es necesario algún método para indicar a quién va dirigida la transmisión.
- Se precisa un mecanismo para regular la transmisión. En este sentido, se puede observar que, si dos estaciones intentan transmitir simultáneamente, sus señales se superpondrán produciéndose errores. También puede presentarse el caso en que una estación decide transmitir continuamente durante un largo periodo de tiempo, apropiándose del medio en detrimento de las demás estaciones.

Para solucionar estos problemas las estaciones transmiten datos en bloques pequeños llamados tramas. Cada trama consta de una porción de los datos que una estación

desea transmitir, y con una cabecera de trama, la cual contiene información de control. A cada estación en el bus se le asigna una dirección única que se incluye en la cabecera junto con la dirección destino de la trama.

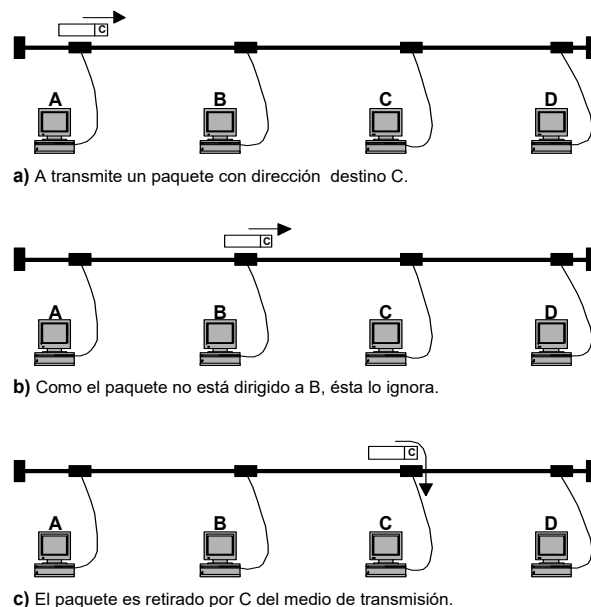


Figura 7.1.1.1: Transmisión de una trama en una topología bus

En la Figura 7.1.1 se ilustra este esquema. En este ejemplo, la estación A desea transmitir una trama de datos a C, de modo que la cabecera de la trama incluirá la dirección de C. En la propagación a lo largo del bus, la trama es detectada por B quién lee la dirección destino en la misma. Al verificar que no va dirigida hacia ella, ignora la trama. C, por su parte, al determinar que la trama va dirigida a ella copia los datos en su buffer, mientras la trama sigue su viaje hasta ser absorbida por el terminador.

La estructura de la trama resuelve el primer problema mencionado anteriormente: proporciona un mecanismo para indicar el receptor de los datos. También proporciona una herramienta básica para resolver el segundo problema, que es el control de acceso al medio. En particular, las estaciones transmiten por turnos en forma cooperativa, lo que implica el uso de información de control adicional en la cabecera de las tramas.

7.1.2. Topología Estrella

En redes LAN con topología estrella cada estación está directamente conectada a un nodo central, generalmente a través de dos enlaces punto a punto, uno para transmisión y otro para recepción. En general existen dos alternativas para el funcionamiento del nodo central.

- **Modo difusión.** La transmisión de una trama por parte de una estación se retransmite sobre todos los enlaces de salida del nodo central. En este caso el nodo central se denomina concentrador o hub.
Aunque la disposición física es una estrella, funciona lógicamente como un bus: una transmisión desde cualquier estación es recibida por el resto de estaciones. En este esquema puede transmitir sólo una estación por vez.
- **Modo conmutación.** El nodo central es un dispositivo de conmutación de tramas; esto es, una trama entrante es almacenada por el nodo y luego retransmitida sobre un enlace de salida hacia la estación destino. El nodo que realiza esta operación se denomina conmutador o switch.

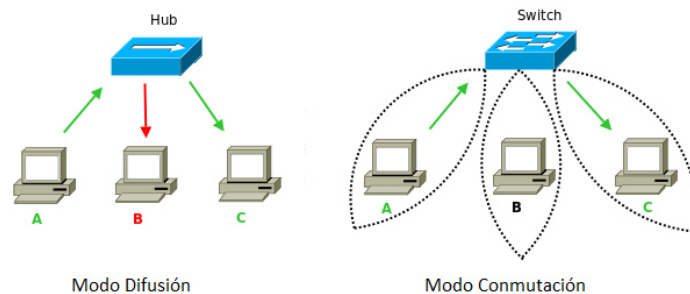


Figura 7.1.2.1: Topología estrella: difusión y conmutación

Como puede observarse en la Figura 7.1.2.1, en modo difusión los hubs se comportan como simples repetidores enviando la trama por cada una de las salidas. En modo conmutación, en cambio, para poder dirigir la trama al destino correcto, los switches deben leer la dirección destino en la cabecera de la misma. En las redes LAN actuales se usa el modo de conmutación porque provee mayor capacidad de transmisión que el modo difusión.

7.2. Arquitectura LAN

La arquitectura de una LAN se describe mejor en términos de una estratificación de protocolos que en función de organizar sus funciones básicas. Esta sección se inicia con una descripción de la arquitectura de protocolo estandarizado para LAN, que abarca las capas: física, control de acceso al medio (MAC) y control de enlace lógico (LLC). Luego se proporciona una descripción general de las capas MAC y LLC.

7.2.1. Modelo de referencia IEEE 802

Los protocolos definidos específicamente para la transmisión en redes LAN y MAN tratan cuestiones relacionadas con la transmisión de bloques de datos a través de la red. Según el modelo OSI, los protocolos de capas superiores (capas 3 o 4 y superiores)

son independientes de la arquitectura de red, por lo tanto, aplicables a LAN, MAN y WAN. Así pues, el estudio de protocolos LAN está relacionado con las capas inferiores del modelo OSI.

En la Figura 7.2.1.1 se comparan las capas del modelo de referencia LAN con las del OSI. El comité IEEE 802 ha propuesto el Modelo de Referencia IEEE 802 que ha sido adoptado por todas las organizaciones que trabajan en la especificación de estándares para LAN. Dicho modelo consta de las capas Física, Control de Acceso al Medio y Control de Enlace Lógico (estas dos últimas implementan las funciones correspondientes a la Capa de Enlace de Datos en el modelo OSI).

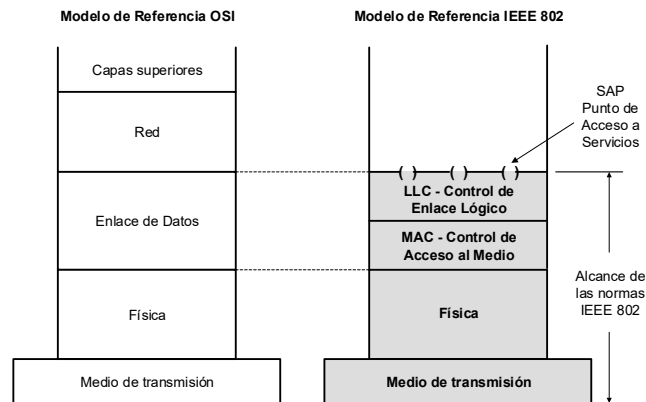


Figura 7.2.1.1: Capas del modelo 802 comparado con el modelo OSI

- **Capa Física.** Es coincidente con la capa física del modelo OSI, e incluye funciones tales como:

1. Codificación/decodificación de señales.
2. Generación/eliminación de preámbulo (bits para sincronización).
3. Transmisión/recepción de bits.

Pero, además, la capa física del modelo 802 incluye una especificación del medio de transmisión y de la topología. Generalmente, en el modelo OSI esta especificación se considera que está “debajo” de la capa física. Sin embargo, dado que la elección del medio de transmisión y la topología es crítica en el diseño de redes LAN, se ha incluido en la capa física del modelo IEEE 802 la especificación del medio.

- **Capa Enlace de Datos.** Por encima de la capa física se encuentran las funciones asociadas a los servicios ofrecidos a los usuarios LAN. Entre ellas se encuentran las siguientes:

1. En transmisión: ensamblado de datos en tramas con campos de dirección y de detección de errores.

2. En recepción: desensamblado de tramas, reconocimiento de dirección y detección de errores.
3. Control de acceso al medio de transmisión de la LAN.
4. Interfaz con las capas superiores y control de errores y de flujo.

Estas funciones se asocian generalmente a la capa de Enlace de Datos de OSI. No obstante, en el Modelo de Referencia LAN estas funciones se han dividido en dos subcapas que se especifican a continuación:

- **Capa de Control de Acceso al Medio (MAC, Medium Access Control).** Es competencia de esta capa las tres primeras funciones enunciadas anteriormente.
- **Capa de Control de Enlace Lógico (LLC, Logical Link Control).** Tiene que ver con la cuarta función expresada anteriormente.

La separación de las funciones de comunicación en solo dos capas en el Modelo de Referencia LAN se debe a las siguientes razones:

- La lógica necesaria para la gestión de acceso a un medio compartido no se encuentra en la capa de Enlace de Datos del Modelo OSI. Recuérdese que el Modelo OSI contempla una conexión independiente entre cada estación y la red, mediante un enlace punto a punto. En una LAN de difusión, en cambio, todas las estaciones están conectadas a un único medio compartido.
- Se pueden ofrecer varias opciones MAC para el mismo LLC.
- Se ha decidido no incluir una Capa de Red en el Modelo de Referencia LAN, que sí está en el Modelo OSI. Esto es debido a que en una LAN de difusión no existen nodos de conmutación, por lo tanto, la función de entrega y recepción de los paquetes entre dispositivos es realizada directamente por un protocolo de la capa MAC que opera sólo en los dispositivos de usuario y no en los dispositivos de red.

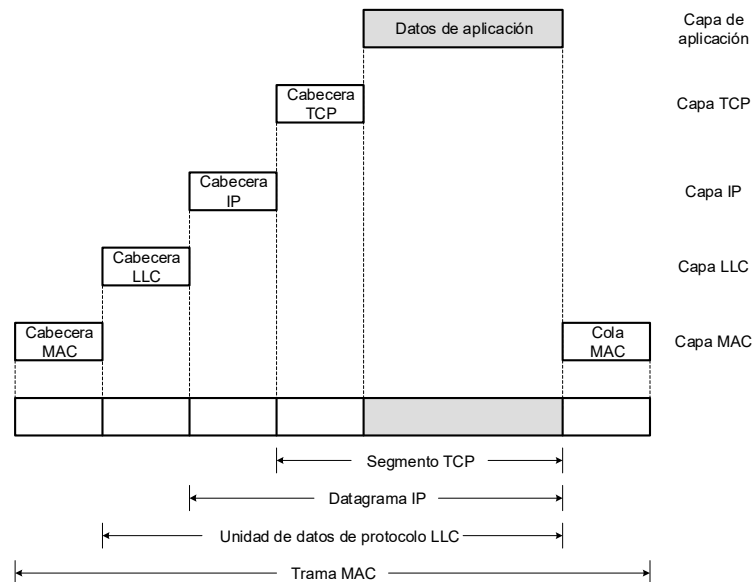


Figura 7.2.1.2: Arquitectura de protocolos LAN operando en un ambiente TPC/IP

En la Figura 7.2.1.2 se ilustra la relación existente entre los niveles de la arquitectura mostrada. Los datos de nivel superior (se ha tomado como ejemplo la arquitectura TCP/IP) se pasan hacia abajo al nivel LLC, que añade una cabecera de información de control dando lugar a una unidad de datos de protocolo o PDU (Protocol Data Unit) LLC. Esta información de control se utiliza para el funcionamiento del protocolo LLC. La PDU LLC se pasa a la capa MAC, que añade información de control al principio y al final del paquete creando una trama MAC. Una vez más es necesaria la información de control en la trama para el funcionamiento del protocolo MAC.

7.2.2. Control de Enlace Lógico

La capa LLC en redes LAN es similar en varios aspectos a otras capas de enlace de uso común. Como todas las capas de enlace, LLC está relacionado con la transmisión de una unidad de datos de protocolo del nivel de enlace (PDU) entre dos estaciones, sin necesitar un nodo de conmutación intermedio. LLC presenta dos características no compartidas por la mayor parte de otros protocolos de control de enlace:

- Debe admitir el acceso múltiple, consecuencia de la naturaleza de medio compartido del enlace (esto difiere de una línea multipunto en que ahora no existe ningún nodo primario).
- La capa MAC lo descarga de algunos detalles del acceso al enlace.

El direccionamiento en LLC implica la especificación de los usuarios LLC origen y destino. Normalmente, un usuario es un protocolo de una capa superior o una función de gestión de red en la estación. Manteniendo la terminología OSI para el usuario de una capa de la arquitectura de protocolos, estas direcciones de usuario LLC se denominan puntos de acceso al servicio (SAP, Service Access Point).

En primer lugar, se describirán los servicios que ofrece LLC a un usuario de una capa superior, discutiendo posteriormente el protocolo LLC.

Servicios LLC

LLC especifica los mecanismos para direccionar estaciones a través del medio y para controlar el intercambio de datos entre dos usuarios. El funcionamiento y formato de este estándar están basados en HDLC¹. Existen tres posibles servicios para dispositivos conectados que usan LLC:

- Servicio no orientado a conexión sin confirmación: este servicio es de tipo datagrama. Es muy sencillo, puesto que no incluye mecanismos de control de flujo ni de errores, por lo que no está garantizada la recepción de los datos. En cualquier caso, en la mayoría de los dispositivos existe alguna capa superior de software encargada de gestionar las cuestiones de fiabilidad.
- Servicio en modo conexión: este servicio es similar al ofrecido por HDLC. Se establece una conexión lógica entre dos usuarios que intercambian datos, existiendo control de flujo y de errores. Estos dos servicios se describen en el Apéndice A del presente capítulo.
- Servicio no orientado a conexión con confirmación: es una mezcla de los dos anteriores. Los datagramas son confirmados, pero no se establece conexión lógica previa.

El servicio no orientado a conexión sin confirmación requiere una lógica mínima y es útil en dos situaciones. En primer lugar, en aquellas en las que el software de las capas superiores ofrece la fiabilidad y los mecanismos de control de flujo necesarios, evitándose la duplicidad. Por ejemplo, TCP podría ofrecer los mecanismos necesarios para asegurar una recepción de datos fiable. En segundo lugar, existen situaciones en las que el coste de establecimiento y mantenimiento de la conexión resulta injustificado e incluso contraproducente (por ejemplo, las actividades de adquisición de datos que implican el muestreo periódico de fuentes de datos, como sensores e informes automáticos de autotest de seguridad de equipos o componentes de red). En una aplicación de supervisión, la pérdida ocasional de datos no va a provocar problemas siempre que el siguiente informe llegue pronto. Así, en la mayoría de los casos, son preferibles los servicios no orientados a conexión sin confirmación.

El servicio en modo conexión se puede utilizar en dispositivos muy simples, como controladores de terminal, que disponen de poco software por encima de este nivel. En estos casos, el servicio proporciona mecanismos de control de flujo y de fiabilidad, normalmente implementados en capas superiores del software de comunicaciones.

El servicio no orientado a conexión confirmado resulta útil en varias situaciones. Con el servicio en modo conexión, el software de control de enlace lógico debe mantener algún tipo de tabla conteniendo el estado de cada conexión activa. Si el usuario necesita garantizar la recepción, pero existe un gran número de destinos para los datos, el

¹ HDLC (High-Level Data Link Control, control de enlace de datos de alto nivel) es un protocolo de comunicaciones de propósito general punto a punto, que opera a nivel de enlace de datos

servicio en modo conexión no resulta práctico dado el gran número de tablas necesarias. Un ejemplo es un proceso de control o una planta automatizada donde es necesario un dispositivo central para comunicar con un gran número de procesadores y controladores programables. Otra posible utilización de este servicio es la gestión de alarmas o señales de control de emergencia de una fábrica: dada su importancia, es necesaria una confirmación, de modo que el emisor pueda estar seguro de que se recibió la señal. Por otro lado, dada la urgencia de la señal, el usuario podría no desear perder tiempo en establecer una conexión lógica como paso previo al envío de los datos.

Protocolo LLC

El protocolo LLC básico se diseñó después de HDLC y presenta funciones y formatos similares a él. Las diferencias entre los dos protocolos se pueden resumir como sigue:

- LLC hace uso del modo de operación balanceado asíncrono de HDLC para dar soporte al servicio LLC en modo conexión. Éste se denomina operación de tipo 2, no empleándose los otros modos de HDLC.
- LLC presta un servicio no orientado a conexión sin confirmación usando la PDU de información no numerada, lo que se conoce como operación de tipo 1.
- LLC ofrece un servicio no orientado a conexión confirmado haciendo uso de dos PDU no numeradas nuevas, lo que se denomina operación de tipo 3.
- LLC permite multiplexación mediante el empleo de puntos de acceso al servicio LLC (LSAP).

Los tres protocolos LLC emplean el mismo formato de PDU (Figura 7.2.2.1), consistente en cuatro campos. Cada uno de los campos DSAP (Destination Service Access Point) y SSAP (Source Service Access Point) contiene una dirección de 7 bits que especifica los usuarios LLC destino y origen. Un bit del campo DSAP indica si la dirección es individual o de grupo, mientras que un bit de SSAP indica si la PDU es una orden o una respuesta. El formato del campo de control LLC es idéntico al de HDLC.

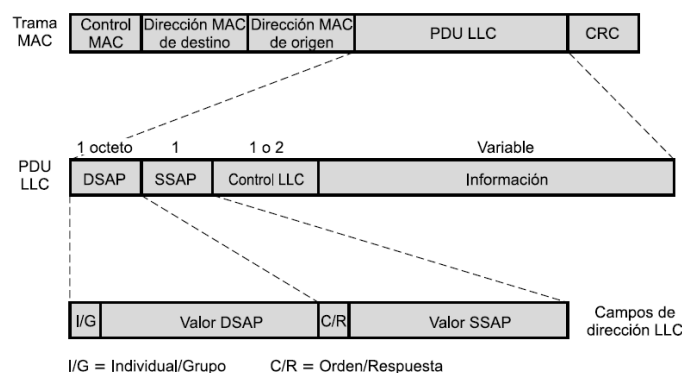


Figura 7.2.2.1: PDU LLC con formato genérico de trama MAC.

Para la operación de tipo 1, que ofrece el servicio no orientado a conexión no confirmado, se utiliza la PDU de información no numerada (UI, Unnumbered Information) para transmitir datos de usuario. No existe confirmación, control de flujo ni control de errores, aunque existe detección de errores y rechazo a nivel MAC.

Otras dos PDU son utilizadas para dar soporte a las funciones de gestión asociadas a los tres tipos de operación. Ambas PDU se usan de la siguiente forma. Una entidad LLC puede emitir una orden (bit C/R=0) XID o TEST, para luego obtener la respuesta de la entidad LLC receptora, con el correspondiente XID o TEST. La PDU XID se usa para intercambiar dos tipos de información: tipos de operación admitidos y tamaño de ventana. Por su parte, la PDU TEST se emplea para llevar a cabo un test en bucle cerrado del camino de transmisión entre dos entidades LLC. Tras recibir una PDU de orden TEST, la entidad LLC de destino envía, tan pronto como le es posible, una PDU de respuesta TEST.

En la operación de tipo 2 se establece una conexión de enlace de datos entre dos SAP LLC, antes de que comience el intercambio de datos. El establecimiento de la conexión se intenta por parte del protocolo de tipo 2 en respuesta a una solicitud de un usuario. La entidad LLC envía una PDU SABME2 para solicitar una conexión lógica con la otra entidad LLC. Si el usuario LLC especificado en el campo DSAP acepta la conexión, la entidad de destino LLC devuelve una PDU de confirmación no numerada (UA, Unnumbered Acknowledgment). La conexión queda identificada unívocamente por el par de SAP de usuario. Si el usuario LLC destino rechaza la solicitud de conexión, su entidad LLC devuelve una PDU de modo desconectado (DM, Disconnected Mode). Una vez que la conexión está establecida, los datos se intercambian, como en HDLC, haciendo uso de PDU de información. Las PDU de información contienen los números de secuencia enviado y recibido para la gestión del orden secuencial y el control de flujo. Como en HDLC, las PDU de supervisión se utilizan para el control de errores y de flujo. Cualquiera de las dos entidades LLC puede terminar una conexión LLC lógica mediante el envío de una PDU de desconexión (DISC).

En la operación de tipo 3 se confirma cada PDU transmitida. Se define una nueva PDU no numerada (no existente en HDLC): la de información no orientada a conexión con confirmación (AC, Acknowledged Connectionless). Los datos de usuario se envían en sucesivas PDU de orden AC, y deben ser confirmadas usando una PDU de respuesta AC. Para prevenir las pérdidas de PDU se utiliza un número de secuencia de 1 bit, de forma que el emisor alterna el uso de 0 y 1 en sus PDU de orden AC y el receptor responde con una PDU AC con el número opuesto al de la orden correspondiente. Sólo se puede enviar una PDU en cada sentido en un instante de tiempo dado.

7.2.3. Control de Acceso al medio

Todas las LAN y MAN constan de un conjunto de dispositivos que deben compartir la capacidad de transmisión de la red, de manera que se requiere algún método de control de acceso al medio con objeto de hacer un uso eficiente de esta capacidad. Ésta es la función del protocolo de control de acceso al medio (MAC).

Los parámetros claves en cualquier técnica de control de acceso al medio son dónde y cómo. Dónde se refiere a si el control se realiza de forma centralizada o distribuida. En un esquema centralizado se diseña un controlador con autoridad para conceder el acceso a la red, de modo que una estación que desee transmitir debe esperar hasta que se le conceda permiso por parte del controlador. En una red descentralizada, las estaciones realizan conjuntamente la función de control de acceso al medio para determinar dinámicamente el orden en que transmitirán.

Un esquema centralizado presenta ciertas ventajas, entre las que se encuentran:

- Puede mejorar el control de acceso proporcionando prioridades, rechazos y capacidad garantizada.
- Permite el uso de una lógica de acceso relativamente sencilla en cada estación.
- Resuelve problemas de coordinación distribuida entre entidades paritarias.

Las principales desventajas de los esquemas centralizados son:

- Genera un punto de falla; es decir, existe un punto en la red tal que, si se produce un fallo en él, fallará toda la red.
- Puede actuar como un cuello de botella, reduciendo las prestaciones.

Los pros y contras de los esquemas distribuidos son los contrarios de los puntos anteriores.

El segundo parámetro (cómo), viene impuesto por la topología y es un compromiso entre factores como el coste, las prestaciones y la complejidad. En general, podemos clasificar las técnicas de control de acceso como síncronas o asíncronas. Con las técnicas síncronas se dedica una determinada capacidad a una conexión. Ésta es la misma aproximación usada en conmutación de circuitos, multiplexación por división en frecuencias (FDM) y multiplexación por división en el tiempo síncrona (TDM). Estas técnicas no son óptimas en redes LAN y MAN dado que las necesidades de las estaciones son impredecibles. Es preferible, por tanto, tener la posibilidad de reservar capacidad de forma asíncrona (dinámica) más o menos en respuesta a solicitudes inmediatas. La aproximación asíncrona se puede subdividir en tres categorías: rotación circular, reserva y contención.

Rotación circular

Con la técnica de rotación circular se le da a cada estación la oportunidad de transmitir, ante lo que la estación puede declinar la proposición o puede transmitir sujeta a un límite superior, especificado generalmente en términos de cantidad de datos a transmitir o tiempo para ello. En cualquier caso, cuando la estación termina, debe ceder el turno de transmisión a la siguiente estación en la secuencia lógica. El control de secuencia puede ser centralizado o distribuido, siendo el método de sondeo un ejemplo de técnica centralizada. Cuando varias estaciones disponen de datos a transmitir durante un largo periodo de tiempo, las técnicas de rotación circular pueden resultar muy eficientes. En cambio, si sólo unas pocas estaciones disponen de datos a transmitir durante un extenso

periodo de tiempo existirá un coste considerable en el paso del turno entre estaciones, ya que la mayoría de ellas no transmiten datos, sino que solamente ceden el turno. En estas circunstancias pueden ser preferibles otras técnicas dependientes de si el tráfico de datos es a ráfagas o continuo.

El tráfico continuo se caracteriza por transmisiones largas y razonablemente continuas; algunos ejemplos son la comunicación de voz, la telemetría² y la transferencia de ficheros grandes. Por su parte, el tráfico a ráfagas se caracteriza por transmisiones cortas y esporádicas, como en el caso de tráfico interactivo terminal-estación.

Reserva

Las técnicas de reserva son adecuadas para tráfico continuo. Generalmente, en estas técnicas se divide el tiempo en ranuras, como en el caso de la técnica TDM síncrona. Una estación que desea transmitir reserva futuras ranuras para un largo, incluso indefinido, periodo de tiempo. Una vez más, las reservas se pueden llevar a cabo de forma centralizada o distribuida.

Contención

Por lo general, las técnicas de contención son apropiadas para tráfico a ráfagas. Con estas técnicas no se realiza control para determinar de quién es el turno, sino que todas las estaciones compiten en una forma que puede ser, como veremos, bastante ruda y caótica. Estas técnicas son necesariamente de naturaleza distribuida, radicando su principal ventaja en el hecho de que son sencillas de implementar y eficientes en condiciones de carga baja o moderada. Sin embargo, para algunas de estas técnicas las prestaciones tienden a deteriorarse bajo condiciones de alta carga.

Aunque tanto las técnicas de reserva centralizadas como las distribuidas se implementan en algunos productos LAN, las más comunes son las técnicas de rotación circular y de contención.

Formato de trama MAC

La capa MAC recibe un bloque de datos de la capa LLC y debe realizar funciones relacionadas con el acceso al medio y la transmisión de datos. Como en otras capas de la arquitectura de protocolos, MAC implementa estas funciones haciendo uso de una unidad de datos de protocolo (PDU) a la que se denomina trama MAC.

El formato exacto de la trama MAC difiere ligeramente para los distintos protocolos MAC en uso. En general, todas las tramas MAC tienen un formato similar al de la Figura 7.2.2.1. Los campos de esta trama son:

² La telemetría es una tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema

- Control MAC: este campo contiene información de control de protocolo necesaria para el funcionamiento del protocolo MAC. Por ejemplo, aquí se podría indicar un nivel de prioridad.
- Dirección MAC de destino: punto de conexión física MAC en la LAN del destino de la trama.
- Dirección MAC de origen: punto de conexión física MAC en la LAN del origen de la trama.
- LLC: datos LLC de la capa inmediatamente superior.
- CRC: campo de comprobación de redundancia cíclica, también conocido como campo de secuencia de comprobación de trama (FCS, Frame Check Sequence). Como en HDLC y en otros protocolos de control de enlace de datos, este campo es un código que permite detectar errores.

En la mayor parte de los protocolos de control del enlace de datos, la entidad del protocolo de nivel de enlace es responsable, no sólo de la detección de errores haciendo uso del campo CRC, sino también de la recuperación de éstos mediante la retransmisión de las tramas erróneas. En la arquitectura de protocolos LAN, estas dos funciones se dividen entre las capas MAC y LLC. La capa MAC es responsable de la detección de errores y del rechazo de tramas erróneas. Opcionalmente, la capa LLC controla qué tramas han sido recibidas correctamente y retransmite las erróneas.

7.3. Puentes

Casi siempre existe la necesidad de llevar a cabo la expansión más allá de los límites de una LAN para proporcionar interconexión con otras LAN y con redes de área amplia. Dos aproximaciones generales se utilizan con este fin: puentes y dispositivos de encaminamiento (router o enrutador). El uso de puentes es la aproximación más sencilla y permite la interconexión de LAN similares, mientras que los dispositivos de encaminamiento son de propósito más general y posibilitan la interconexión de una gran variedad de redes LAN y WAN.

Los puentes se han diseñado para su uso entre redes de área local (LAN) que utilizan protocolos idénticos en las capas física y de acceso al medio (por ejemplo, todas siguiendo la norma IEEE 802.3). Dado que todos los dispositivos usan los mismos protocolos, el volumen de procesamiento necesario en el puente es mínimo. Los puentes más sofisticados permiten la conversión entre formatos MAC diferentes (por ejemplo, la interconexión de una LAN Ethernet con una en anillo con paso de testigo).

Dado que los puentes se utilizan en situaciones en las que todas las LAN tienen las mismas características, el lector puede preguntarse por qué no utilizar simplemente una LAN mayor. Dependiendo de ciertas circunstancias, existen varias razones para el empleo de varias LAN interconectadas mediante puentes:

- **Fiabilidad:** el peligro, en la conexión de todos los dispositivos de procesamiento de datos de un organismo en una sola red es que, un fallo en ella puede imposibilitar la comunicación para todos los dispositivos. En cambio, haciendo uso de puentes, la red puede dividirse en unidades auto contenidas.
- **Prestaciones:** en general, las prestaciones de una LAN decrecen cuando aumenta el número de dispositivos o la longitud del medio. A veces, varias LAN pequeñas pueden ofrecer mejores prestaciones si se pueden agrupar los dispositivos de manera tal que el tráfico interno de cada red supere significativamente el tráfico entre ellas.
- **Seguridad:** la disposición de varias LAN puede mejorar la seguridad en las comunicaciones. Es deseable mantener diferentes tipos de tráfico (por ejemplo, contabilidad, personal, planificación estratégica) con necesidades diferentes de seguridad y en medios separados físicamente. Simultáneamente a este hecho, los diferentes tipos de usuarios con diferentes niveles de seguridad necesitan comunicarse mediante mecanismos controlados y supervisados.
- **Geografía:** es evidente que se necesitan dos LAN separadas para dar soporte a dispositivos agrupados en dos lugares geográficamente distantes. Incluso en el caso de dos edificios separados por una autopista, resulta más fácil usar como puente un enlace de microondas que intentar disponer un cable coaxial entre los dos edificios.

Funciones de los puentes

En la Figura 7.3.1 se ilustra el funcionamiento de un puente que conecta dos redes LAN, A y B, que utilizan el mismo protocolo MAC. En este ejemplo, el puente se conecta a ambas redes, si bien, usualmente, la función de puente se lleva a cabo mediante dos «semi-puentes», uno conectado a cada LAN. Las funciones del puente son pocas y sencillas:

- Lectura de todas las tramas transmitidas en A y aceptación de aquellas dirigidas a estaciones en B.
- Retransmisión hacia B de cada una de las tramas, haciendo uso del protocolo de control de acceso al medio de esta LAN.
- El mismo proceso para el tráfico de B a A.

Merece la pena resaltar varios aspectos del diseño de los puentes:

- El puente no modifica el contenido o formato de las tramas que recibe ni las encapsula con una cabecera adicional. Cada trama a transmitir es simplemente copiada desde una LAN y repetida con, exactamente, el mismo patrón de bits en la otra LAN. Esto se puede hacer así dado que las dos LAN usan los mismos protocolos.
- El puente debe disponer de suficiente memoria temporal para aceptar demandas de pico. Para un periodo de tiempo pequeño, las tramas se pueden recibir más rápidamente de lo que se pueden retransmitir.
- El puente debe presentar capacidad de direccionamiento y de encaminamiento. Como mínimo, debe conocer las direcciones de cada red para determinar qué tramas debe pasar. Además, pueden existir más de dos redes LAN interconectadas por varios puentes, en cuyo caso puede ser necesario encaminar una trama a través de varios puentes a lo largo de su trayecto desde el origen hasta el destino.

- Un puente puede conectar más de dos LAN.

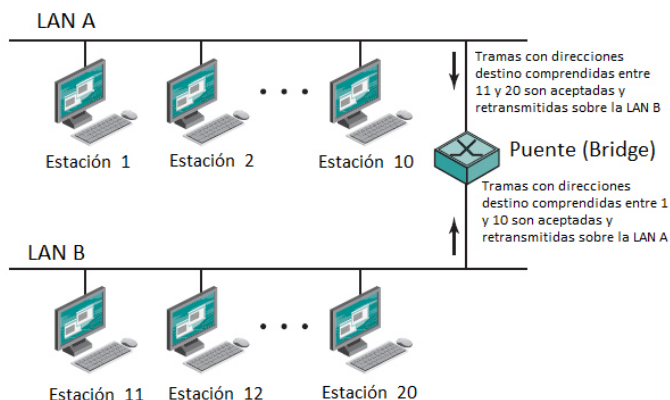


Figura 7.3.1: Funcionamiento de un puente [1]

Encaminamiento estático

Existe una tendencia en muchas organizaciones hacia un aumento del número de redes LAN interconectadas mediante puentes. Cuanto mayor es este número, más importante resulta proporcionar rutas alternativas entre LAN a través de puentes para cuestiones de balanceado de carga y reconfiguración en caso de aparición de fallos. De este modo, muchas organizaciones encuentran que las tablas de encaminamiento estáticas predefinidas resultan inadecuadas, siendo necesario algún tipo de encaminamiento dinámico.

Considérese la configuración de la Figura 7.3.2 Supongamos que la estación 1 transmite una trama sobre la LAN A con destino a la estación 6. La trama se recibirá en los puentes 101, 102 y 107, de forma que todos ellos determinarán que la estación de destino no se encuentra en una de las LAN a las que están conectados. Por tanto, cada puente tomará una decisión acerca de si retransmitir o no la trama sobre sus otras LAN con objeto de dirigirla hacia el destino deseado. En este caso, el puente 102 debería repetir la trama sobre la LAN C, mientras que los puentes 101 y 107 decidirán no llevar a cabo la retransmisión de la trama. Una vez que la trama se ha enviado sobre la LAN C, se recibirá en los puentes 105 y 106, los cuales, como antes, deben decidir si retransmitirla o no. En caso de su retransmisión, el puente 105 puede hacerlo sobre la LAN F, donde la trama será finalmente recibida por la estación de destino 6.

Se observa que, en el caso general, el puente debe disponer de capacidad de encaminamiento, de modo que cuando un puente recibe una trama debe decidir si llevar a cabo o no su retransmisión. Si el puente se encuentra conectado a dos o más redes, debe decidir si retransmitir la trama o no y, en su caso, sobre qué LAN hacerlo.

La decisión de encaminamiento puede no resultar siempre tan sencilla. En la Figura 7.3.2 se muestra la existencia de dos rutas entre las LAN A y E. Esta redundancia proporciona una disponibilidad superior en la interconexión de las redes, posibilitando el balanceado de la carga. En este caso, si la estación 1 transmite una trama a través de la LAN A dirigida a la estación 5 de la LAN E, los puentes 101 o 107 pueden retransmitir la trama. Parece más adecuado que sea el 107 quien lo haga dado que sólo necesita un salto, mientras que si lo hiciera el puente 101 se requerirían dos saltos. Una consideración adicional es que pueden producirse cambios en la configuración, de manera que, por

ejemplo, el puente 107 puede fallar, en cuyo caso las tramas siguientes desde la estación 1 hacia la 5 deberían ir a través del puente 101. Por tanto, se puede decir que la capacidad de encaminamiento debe tener en consideración la topología de la configuración de interconexión entre redes y puede requerir ser alterada dinámicamente.

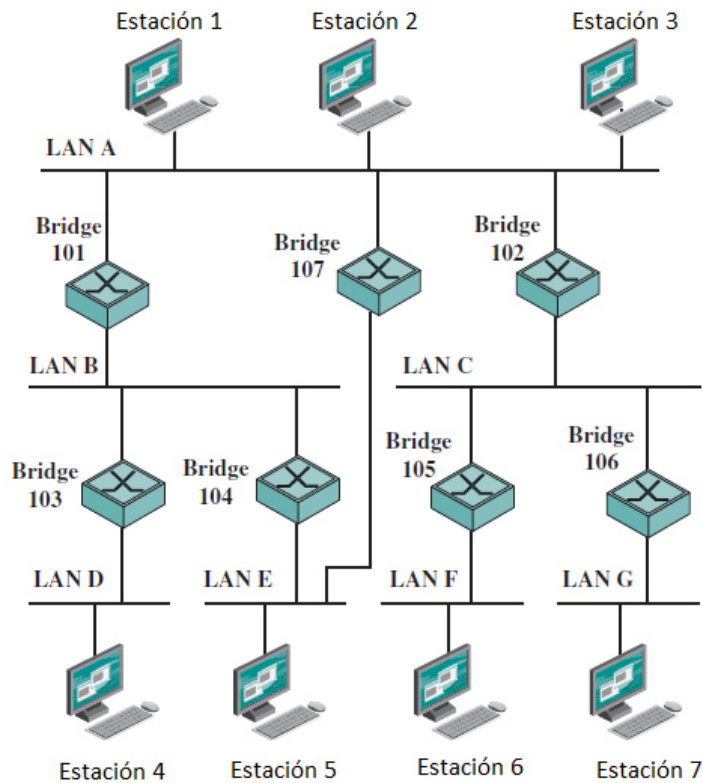


Figura 7.3.2: Configuración de puentes y LAN's con rutas alternativas [1]

En los últimos años se han propuesto e implementado varias técnicas de encaminamiento. La más sencilla y comúnmente usada es la de encaminamiento estático. Esta estrategia resulta adecuada para un número pequeño de redes LAN y para interconexiones relativamente estables. Adicionalmente, dos grupos del comité IEEE 802 han desarrollado especificaciones para estrategias de encaminamiento. El grupo IEEE 802.1 ha propuesto una normalización de encaminamiento basada en el uso del algoritmo del árbol de expansión (spanning tree), mientras que el comité de anillo con paso de testigo (token ring), IEEE 802.5, ha propuesto su propia especificación, denominada encaminamiento desde el origen (source routing).

Funcionamiento del encaminamiento estático: se selecciona una ruta para cada pareja de LAN origen-destino en la configuración. Si se dispone de rutas alternativas entre dos LAN, generalmente se selecciona aquella con menor número de saltos. Las rutas son fijas, o al menos sólo cambian cuando se produce un cambio en la topología de la interconexión.

La estrategia para llevar a cabo una configuración de encaminamiento fija para puentes es similar a la empleada en una red de conmutación de paquetes (se estudia en Comunicaciones II). Se crea una matriz de encaminamiento central, almacenada quizá en un centro de control de red, que indica, para cada pareja de LAN origen-destino, la identidad del primer puente en la ruta. Así, por ejemplo, la ruta desde la LAN E a la LAN F comienza yendo a la LAN A a través del puente 107. Consultando de nuevo la matriz, la ruta desde la LAN A a la F pasa por el puente 102 para alcanzar la LAN C.

Finalmente, la ruta desde la LAN C a la LAN F es directa a través del puente 105. Por tanto, la ruta completa desde la LAN E hasta la LAN F es puente 107, LAN A, puente 102, LAN C, puente 105.

Las tablas de encaminamiento se pueden obtener a partir de esta matriz y se guardan en cada puente. Cada puente precisa una tabla para cada una de las LAN a las que está conectado. La información de cada tabla se obtiene a partir de una sola fila de la matriz. Por ejemplo, el puente 105 tiene dos tablas, una para las tramas recibidas de la LAN C y otra para las de la LAN F. La tabla muestra, para cada dirección MAC destino posible, la identidad de la LAN a la que el puente debería enviar la trama.

Una vez establecidas las tablas, el encaminamiento es una tarea sencilla. Un puente copia las tramas procedentes de cada una de sus LAN. Si la dirección MAC de destino corresponde con una entrada de su tabla de encaminamiento, la trama se retransmite a través de la LAN apropiada.

La estrategia de encaminamiento estático se puede implementar en los productos comerciales existentes, siendo necesaria la carga manual de las tablas de encaminamiento por parte de un administrador de red. Las principales ventajas de esta estrategia son su sencillez y sus mínimas necesidades de procesamiento. Sin embargo, en una interconexión compleja, en la que los puentes se pueden incorporar dinámicamente y pueden existir fallos, esta estrategia resulta demasiado limitada.

Técnica del árbol de expansión

El método del árbol de expansión es un mecanismo en el que los puentes desarrollan automáticamente una tabla de encaminamiento y la actualizan en respuesta a cambios en la topología. El algoritmo consta de tres mecanismos: retransmisión de tramas, aprendizaje de direcciones y mecanismo para evitar bucles.

Retransmisión de tramas

En este esquema, un puente mantiene una base de datos de retransmisión (forwarding database) para cada puerto de conexión a una LAN. La base de datos indica las direcciones de estación para las que las tramas deben transmitirse sobre un puerto dado. Esto se puede interpretar de la siguiente forma: para cada puerto se mantiene una lista de estaciones situadas en el «mismo lado» del puente que el puerto. Por ejemplo, para el puente 102 de la Figura 7.3.2, las estaciones de las LAN C, F y G se encuentran en el mismo lado del puente que el puerto de la LAN C, y las estaciones de las LAN A, B, D y E están en el mismo lado del puente que el puerto de la LAN A. Cuando se recibe una trama por uno de los puertos, el puente debe decidir si la trama se enviará a través suyo y sobre cuál de los otros puertos se realizará la retransmisión. Suponiendo que un puente recibe una trama MAC a través del puerto “x”, se aplican las siguientes reglas:

1. Búsqueda en la base de datos de retransmisión para determinar si la dirección MAC se asocia a un puerto distinto de “x”.
2. Si no se encuentra la dirección MAC de destino, la trama se envía a través de todos los puertos excepto por el que llegó. Esto es parte de la técnica de aprendizaje que se describe más adelante.

3. Si la dirección de destino se encuentra en la base de datos para algún puerto “y”, se determina si ese puerto se encuentra en estado de bloqueo o de envío. Por razones que se explicarán más adelante, un puerto puede estar a veces bloqueado, lo que le impide emitir o recibir tramas.
4. Si el puerto “y” no está bloqueado, se transmite la trama a través de ese puerto sobre la LAN a la que se encuentra conectado.

Aprendizaje de direcciones

El esquema anterior se basa en la existencia en los puentes de una base de datos de retransmisión que indica la dirección de cada estación destino desde el puente en cuestión. Como en el caso del encaminamiento estático, esta información puede cargarse a priori en el puente. Sin embargo, sería deseable un mecanismo automático efectivo para aprender las direcciones de cada estación. Un esquema sencillo para conseguir esta información se basa en el empleo del campo de dirección origen presente en las tramas MAC. La estrategia es como sigue:

- Cuando se recibe una trama por un determinado puerto, es evidente que viene desde la dirección de la LAN entrante. El campo de dirección origen de la trama indica la estación emisora, de modo que un puente puede actualizar su base de datos de retransmisión a partir de esa dirección MAC. Con el fin de permitir cambios en la topología, cada entrada en la base de datos dispone de un temporizador.
- Cuando se añade una nueva entrada a la base de datos, se activa el temporizador asociado. Si éste expira, se elimina la entrada de la base de datos dado que la información de dirección correspondiente puede no ser válida por más tiempo.
- Cada vez que se recibe una trama se comprueba su dirección origen en la base de datos. Si se encuentra como entrada ya en ésta, se actualiza (la dirección puede haber cambiado) y se reinicia el temporizador. Si la entrada, por el contrario, no está en la base de datos, se crea una nueva con su propio temporizador.

Algoritmo del árbol de expansión (Spanning Tree Protocol, 802.1D)

El mecanismo de aprendizaje de direcciones descrito anteriormente es efectivo si la topología de la interconexión de redes es un árbol; es decir, si no existen rutas alternativas en la red. La existencia de rutas alternativas implica la aparición de bucles cerrados. Por ejemplo, la siguiente ruta en la Figura 7.3.2 es un bucle cerrado: LAN A, puente 101, LAN B, puente 104, LAN E, puente 107, LAN A.

Para analizar el problema creado por la existencia de un bucle cerrado se considera la Figura 7.3.2. La estación A transmite una trama destinada a la estación B en el instante de tiempo t_0 .

Ambos puentes capturan esta trama y actualizan sus bases de datos para indicar que la estación A se encuentra en la dirección de la LAN X, y retransmiten la trama a través de la LAN Y. Supongamos que el puente “a” la retransmite en el instante de tiempo t_1 y el puente b un poco después, en t_2 .

Así, B recibirá dos copias de la trama. Además, cada puente recibirá las transmisiones de los otros a través de la LAN Y. Obsérvese que cada transmisión es una trama MAC con la dirección origen de A y la dirección destino de B, con lo que cada puente actualizará su base de datos para indicar que la estación A se encuentra en la dirección de la LAN Y. Ningún puente es capaz ahora de retransmitir una trama dirigida a la estación A.

Para solucionar este problema se utiliza un sencillo resultado de la teoría de grafos: para cualquier grafo conectado, compuesto de nodos y de terminales que conectan cada par de nodos, existe un árbol de expansión de terminales que mantiene la conectividad del grafo, pero no contiene bucles cerrados. En términos de interconexión, cada red LAN se corresponde con un nodo del grafo y cada puente con una arista. Así, en la Figura 7.3.2, la eliminación de uno (y sólo uno) de los puentes 107, 101 y 104 da lugar a un árbol de expansión.

Resulta deseable el desarrollo de un algoritmo sencillo mediante el que los puentes de la interconexión puedan intercambiar información suficiente (sin intervención de los usuarios) para obtener el árbol de expansión. El algoritmo debe ser dinámico; es decir, los puentes deben ser capaces de percibirse ante un cambio en la topología y obtener automáticamente un nuevo árbol de expansión.

El algoritmo del árbol de expansión desarrollado por IEEE 802.1, como su propio nombre sugiere, puede desarrollar dicho árbol de expansión. Todo lo que se precisa es que cada uno de los puentes tenga asignado un identificador único y se asocien costes a cada uno de los puertos de los puentes. Aparte de cualquier consideración especial, todos los costes podrían ser iguales, lo que produciría un árbol de menor número de saltos. El algoritmo implica el intercambio de un número reducido de mensajes entre todos los puentes para obtener el árbol de expansión de mínimo coste.

Cuando se produzca un cambio en la topología, los puentes recalcularán automáticamente el árbol de expansión (Figura 7.3.3).

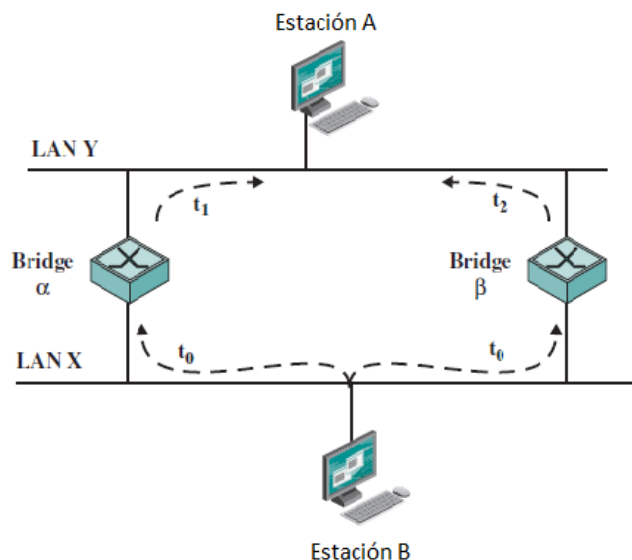


Figura 7.3.3: Algoritmo de spanning tree [1]

Existen múltiples variantes del STP (802.1D) debido a que principalmente, es importante mejorar el tiempo de convergencia del algoritmo. Una de estas variantes es

el Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP), bajo el estándar IEEE 802.1w. Otra de las variantes es el Multiple Spanning Tree Protocol (MSTP), bajo el estándar IEEE 802.1s. Finalmente, el 29 de marzo de 2012 la IEEE aprobó 802.1aq como un estándar para reemplazar IEEE 802.1D, IEEE 802.1w, IEEE 802.1s.

La siguiente tabla 7.3.4 es un resumen de los distintos protocolos que resuelven el problema de árbol expandido.

Tabla 7.3.4: Protocolos STP y sus variantes

Standard	Descripción
IEEE 802.1D (STP)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Proporciona caminos redundantes, pero evita bucles indeseables en la red. ✓ En una red de capa 2, sólo puede existir una ruta activa entre dos estaciones. ✓ STP calcula y selecciona la mejor ruta sin bucles. ✓ Los puertos de la red de capa 2 envían y reciben tramas STP y la electrónica de red (switches) utilizan la trama para construir una ruta libre de bucle. ✓ Si existe un bucle, las estaciones finales reciben mensajes duplicados y los switches de la aprenden las direcciones MAC de esas estaciones. ✓ STP bloquea los puertos de el/los switches que generan un bucle ✓ STP define árbol de switches que tiene un “Root Bridge” y genera caminos libres de bucles desde el “Root” hacia todos los dispositivos. ✓ STP define un “Root Port” (RP), un puerto con menor costo hacia el “Root Bridge”, y un “Port Designed” (DP) en cada segmento LAN.
IEEE 802.1w (RSTP)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La principal diferencia es que RSTP coloca a 3 estados “listening”, “blocking”, y “disabled” en un estado llamado estado “discarding”. ✓ En STP, los switches envían información del protocolo (BPDU, Bridge Protocol Data Unit) cuando un switch recibe el pedido de un “Root Bridge”. En RSTP, los switches envían un BPDU cada vez que hacen un “hello” ✓ Incluye dos tipos de puertos adicionales a STP: “Alternate Ports” y “Backup Ports”
IEEE 802.1s (MSTP o MISTP)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite la coexistencia de múltiples VLAN’s (redes privadas virtuales) en una solo instancia de árbol expandido ✓ Reduce los requerimientos de recursos de procesamiento y tráfico de datos de control, mientras mantiene la posibilidad de mantener múltiples árboles de expansión, para propósitos de balanceo de carga
IEEE 802.1aq (SPB)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reemplaza a los anteriores ✓ La prevención del bucle la realiza es un “Plano de Control”, que puede analizar la topología de toda la red ✓ Ofrece excelentes tiempos de convergencia ✓ Rápida restauración de la conexión.

	✓ Tiene dos modos de operación: Shortest Path Bridging - VID (SPBV) y Shortest Path Bridging - MAC (SPBM)
--	---

7.4. Hubs (concentradores) y Switches (conmutadores)

Debido al crecimiento dramático que han experimentado las redes de dispositivos, han proliferado diversos tipos de equipamiento electrónico para la interconexión de redes LAN: concentradores (prácticamente no se comercializan) y conmutadores. Estos últimos pueden ser clasificados en dos categorías: conmutadores de la capa 2 y conmutadores de la capa 3.

Por cuestiones que pretenden explicar cómo fue la evolución de los dispositivos de interconexión, se hará una breve descripción de los equipos concentradores (hubs), los cuales en la actualidad están prácticamente en desuso.

7.4.1. Concentradores

Anteriormente se ha utilizado el término concentrador en el contexto de una LAN con topología en estrella. El concentrador es un elemento activo que actúa como elemento central de la estrella. Cada estación se conecta al concentrador mediante dos enlaces (transmitir y recibir). El concentrador actúa como un repetidor: cuando transmite una única estación, el concentrador replica la señal en la línea de salida hacia cada estación que está conectada. Generalmente, el enlace consiste en dos pares trenzados sin malla (UTP). Dada la alta velocidad y la baja calidad de transmisión del par trenzado, la longitud de un enlace está limitada en torno a 100 m. Como alternativa, se puede usar un enlace de fibra óptica, en cuyo caso la longitud máxima es del orden de 500 m.

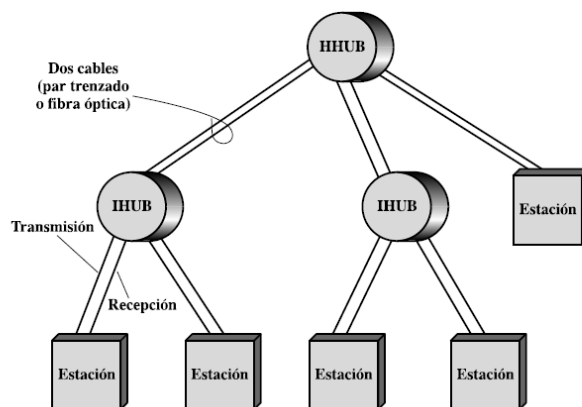


Figura 7.4.1: Topología estrella de dos niveles con hubs

Se observa que, aunque este esquema es físicamente una estrella, funciona lógicamente como un bus: una transmisión por parte de una estación se recibe en el resto de estaciones y se producirá una colisión si dos estaciones transmiten al mismo tiempo.

Varios niveles de concentradores se pueden poner en cascada formando una configuración jerárquica. En la Figura 7.4.1 se muestra una configuración en dos niveles. Existe un concentrador “raíz” (HHUB, Header Hub) y uno o más concentradores intermedios (IHUB, Intermediate Hub). Cada concentrador puede ser una mezcla de estaciones y otros concentradores conectados a él por debajo.

7.4.2. Conmutadores de capa dos (Switches)

En los últimos años, un nuevo dispositivo, el switch de capa 2, ha desplazado definitivamente al hub y ha llegado para quedarse a dar respuesta a las LAN de alta velocidad.

Para aclarar la distinción entre concentradores e conmutadores, la Figura 7.4.2.1(a) muestra un diseño típico de bus de una LAN tradicional de 10 Mbps. Se instala un bus al cual se conectan cuatro dispositivos.

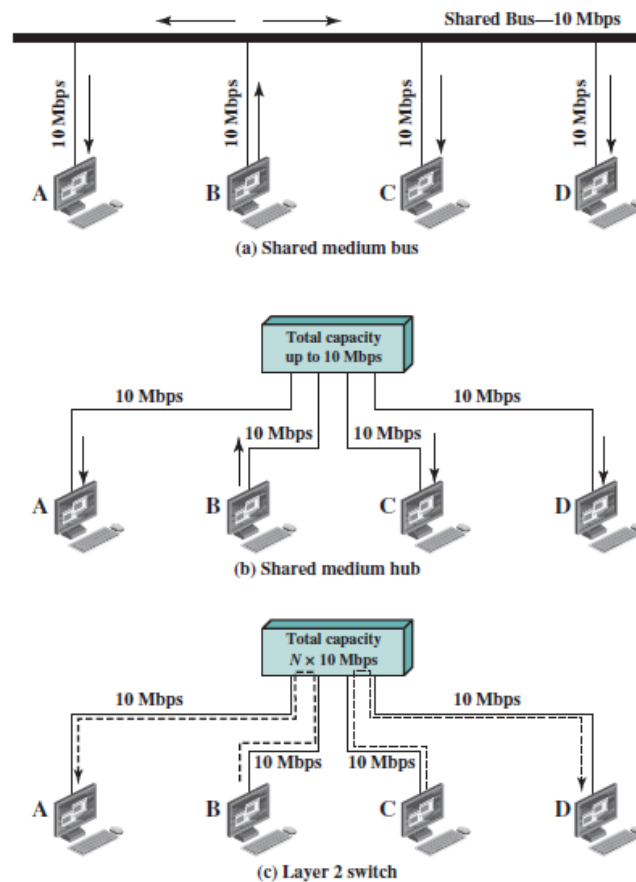


Figura 7.4.2.1: Forma de operar de un concentrador y un conmutador [1]

En la figura, la estación B está transmitiendo. Esta transmisión va desde B, a través del conector de B con el cable, a lo largo del bus en ambas direcciones y a lo largo de las líneas de acceso de cada una de las otras estaciones adjuntas. En esta configuración, todas las estaciones deben compartir la capacidad total del bus, que es de 10 Mbps.

Un hub, a menudo instalado en un rack de edificio un cableado, utiliza una disposición de cableado tipo estrella para conectar las estaciones al centro. En esta topología, una transmisión desde cualquier estación es recibido por el concentrador y retransmitido en todas las líneas salientes. Por lo tanto, para evitar colisiones, solo una estación puede transmitir a la vez. De nuevo, la capacidad total de la LAN es de 10 Mbps.

Se puede obtener una importante mejora de rendimiento con un switch de capa 2. En este caso, el switch actúa con algo de “inteligencia”. De esta forma, una trama entrante de una estación particular se cambia a la apropiada línea de salida que se entregará al destino previsto. Al mismo tiempo, otras líneas no utilizadas se pueden usar para intercambiar tráfico. La figura 7.2.4.1 (c) muestra un ejemplo en el que B está transmitiendo una trama A y al mismo tiempo C está transmitiendo una trama a D. Entonces, en este ejemplo, el rendimiento actual en la LAN es de 20 Mbps, aunque cada dispositivo individual está limitado a 10 Mbps.

Transmisión Full Duplex

Debido a que el switch provee conexiones independientes entre pares de puertos las transmisiones entre las estaciones pueden ser full-duplex. Recuérdese que en LAN de difusión topología en estrella (con hubs) solo está permitido transmisiones half-duplex. En consecuencia, debe tenerse presente que la transmisión full duplex entre las estaciones exige que no haya ningún hub en la LAN; es decir, todos los dispositivos multipuerto deben ser switches.

Funcionalidades del Switch

- Es básicamente un puente multipuerto. Se distingue de éste en que tiene el software y hardware optimizado lo que le permite realizar las funciones con mucha menor latencia.
- Mantiene una Tabla de Filtrado con direcciones, puertos y temporizador.
- Puede establecer pares de conexiones simultáneas. Esto permite que la capacidad de transmisión de las estaciones conectadas al switch pueda crecer en un factor igual a la mitad del número de puertos.
- Transmisión full duplex entre dos estaciones a través de uno o más switches. Agrega mayor capacidad de transmisión.

Componentes de un Switch

Los switches constan de los siguientes componentes internos que se muestran en la Figura 7.4.2.2:

1. Número y tipo de puertos.
2. Buffers.
3. Mecanismos de retransmisión de datagramas.
4. Backplane.

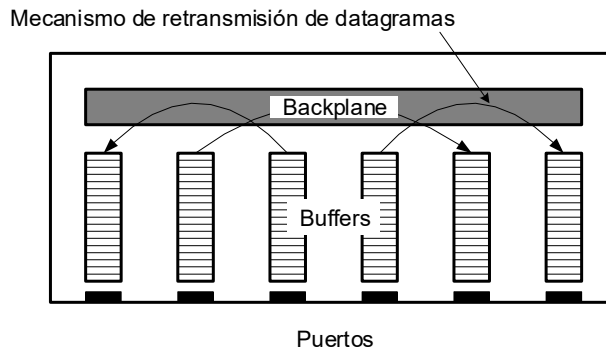


Figura 7.4.2.2: Componentes de un switch

Número y Tipo de Puertos

La gran mayoría de los switches que se utilizan en la actualidad son Ethernet, Fast Ethernet y Gigabit Ethernet. A continuación, se describe un switch standard con aceptables prestaciones (al momento de escribir las presentes notas), conectividad con cable UTP y posibilidad de agregar módulos para conectividad con fibra óptica. Este tipo de dispositivo es recomendable para pequeñas y medianas empresas, además de ser muy fácil de administrar. La Figura 7.4.2.3



Figura 7.4.2.3: Switch Aruba 2530 48G (J9781A)

- ✓ 48 RJ-45 autosensing 10/100 puertos (IEEE 802.3 Type 10BASE-T, IEEE 802.3u Type 100BASE-TX); Duplex: half o full
- ✓ 2 autosensing 10/100/1000 puertos (IEEE 802.3 Type 10BASE-T, IEEE 802.3u Type 100BASE-TX, IEEE 802.3ab Type 1000BASE-T); Duplex: 10BASE-T/100BASE-TX: half o full; 1000BASE-T: solo full
- ✓ 2 puertos fijos Gigabit Ethernet SFP
- ✓ Certificado IPv6
- ✓ Tamaño de la tabla de direcciones MAC: 16000 entradas
- ✓ Procesador: ARM9E @ 800 MHz, 128 MB flash
- ✓ Memoria: 256 MB DDR3 DIMM
- ✓ Montaje en Rack de 19"

Buffering

Los buffers (uno en cada puerto) almacenan los datagramas temporalmente hasta que son transmitidos al puerto específico. Estos buffers juegan un rol muy importante en switches que poseen puertos de 10, 100 y 100 Mbps o 10/100/1000 autosensing porque, además de realizar la inspección de la dirección destino, permiten la transmisión de los datagramas a la velocidad correspondiente. También, es necesario retener datagramas cuando se transmiten datagramas por ráfagas a 1Gbps. El tamaño de un buffer en la

actualidad tiene un valor mínimo de 32 Kbyte (generalmente asignado a cada puerto). También existen tamaños de buffer más importantes que son compartidos por todos los puertos. Por ejemplo, para el switch del ejemplo, el tamaño del buffer de paquetes compartido es de 3 MB.

Mecanismo de Retransmisión

Los switches pueden usar uno de los tres tipos de mecanismos de retransmisión siguientes.

- Almacenamiento y envío (store and forward). El switch acepta una trama que ingresa por un puerto y la almacena temporalmente mientras realiza el control de error usando CRC y otros chequeos. Si el datagrama tiene un error es descartado. Si no tiene error, el datagrama es enviado a la dirección destino por el puerto de salida correspondiente.
- Rápido (cut through). El switch almacena solamente la dirección destino (6 bytes) aprovechando que se encuentra al comienzo de la trama MAC. Una vez leída la dirección destino el switch retransmite inmediatamente el datagrama por la línea de salida correspondiente.
- Rápido modificado (modified cut through). Es similar al mecanismo rápido, excepto que almacena 64 bytes en lugar de 6 bytes antes de enviar el datagrama. Esto es debido a que la mayoría de los errores y colisiones se producen en los primeros 64 bytes de la trama. El switch que utiliza este mecanismo es el menos usado en relación a los dos anteriores.

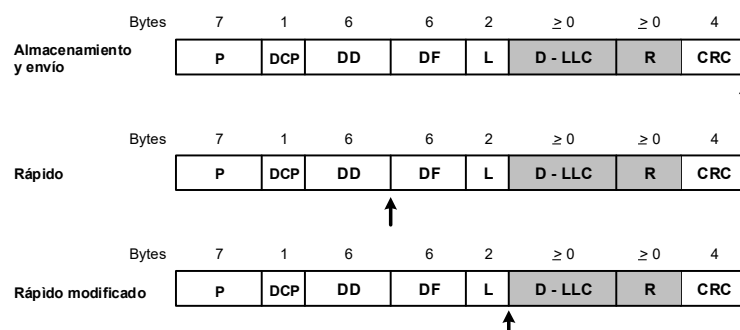


Figura 7.4.2.4: Bytes almacenados según el mecanismo de retransmisión

Consideraciones sobre el Mecanismo de Transmisión

La mayoría de los switches permiten ser configurados bajo cualquiera de los mecanismos de retransmisión considerados. El mecanismo elegido va a depender del tipo de servicio requerido en la red.

- Si se necesita alta velocidad y baja latencia se debe utilizar el mecanismo rápido o rápido modificado. Este mecanismo de retransmisión no evita la posibilidad de retransmisión de datagramas defectuosos. Estas redes deberán asegurar bajas tasas de error, de lo contrario el mecanismo puede convertirse en una pesadilla para el administrador de la red

- Si se necesita estabilidad y eficiencia se de usar el mecanismo de almacenamiento y envío. Este mecanismo introduce mayor retardo en la transmisión, pero mantiene la integridad completa de la red. Este asegura que sólo serán retransmitidos datagramas libres de error.

Arquitectura del Backplane

La arquitectura del backplane define cuan eficientemente son transmitidos los datagramas de un puerto a otro a través de los circuitos del switch.

- La capacidad del switch (en algunos fabricantes llamado “forwarding rate”), es un valor que indica la cantidad bits por segundo que puede traficar un switch. Según el modelo y las prestaciones puede alcanzar a valores de varios decenas y centenas de Gbps. En el caso del conmutador de la figura 7.2.4.3 el “forwarding rate” es de 104 Gbps (paquetes de 64 bytes)
- El indicador de la eficiencia de un conmutador es el “throughput”, el cual expresa la cantidad de paquetes por segundo que puede transmitir un switch, antes de perder un paquete. Tomando como referencia el switch mencionado en el apartado anterior el “thoroughput” es de 77.3 Mpps (paquetes de 64 bytes).
- El tiempo que lleva procesar un paquete dentro de un conmutador es conocido como “latencia”. Siguiendo el mismo dispositivo de referencia, el mismo ofrece una “latencia” en modo Fast Ethernet (100 Mb Latency) $< 7.4 \mu s$ (paquetes de 64 bytes LIFO³) y en Gigabit Ethernet (1000 Mb Latency) $< 2.3 \mu s$ (paquetes de 64 bytes LIFO)

Otras Características de los Switches

Otras características distintivas de los switches son:

1. Ubicación en la red. De acuerdo a la ubicación que tengan en la red los switches pueden ser:
 - a. Switch de escritorio
 - b. Switch de grupo, borde o piso (perimetrales administrables y no administrables)
 - c. Switch troncal de prestaciones medias.
 - d. Switch troncal de prestaciones altas
2. Número de direcciones MAC por puerto. Los switches de borde más económicos sólo permiten una dirección MAC por puerto. En la medida que crecen en las

³ LIFO (Last In, First Out, es el modo de procesar los paquetes en la cola del switch, último paquete ingresado a la cola, primer paquete procesado)

prestaciones, crece el número de MAC que pueden almacenar. Los switches de backbone pueden operar con decenas de miles de direcciones MAC.

3. Administración y monitoreo. Tiene que ver con las facilidades con que cuenta el dispositivo para su administración, como así también con las herramientas de monitoreo que el fabricante tiene desarrolladas (inclusive la capacidad para soportar el protocolo SNMP (Simple Network Management Protocol). En el caso del switch de ejemplo, tiene las siguientes características:
 - a. Interface por línea de comandos
 - b. Interface gráfica (Web browser)
 - c. Aruba AirWave network platform: permite visibilizar los dispositivos que forman la red
 - d. IMC - Intelligent Management Center: permite administrar dispositivos en forma remota desde una herramienta gráfica centralizada
 - e. Menú de configuración
4. Conexión con otras normas: 1, 10, 40 o 100 Gigabit con módulos SFP, conectividad con redes MPLS, ATM o FDDI. En el caso del switch 2530, tiene 2 puertos fijos para Gigabit Ethernet usando módulos SFP.
5. Control de tormenta de broadcast (“Broadcast Storm”). Desconecta retransmisión de paquetes de broadcast en puertos que superaron el umbral de broadcast por segundos.
6. Implementación de VLAN (redes LAN’s virtuales)
7. Funciones de capa 3 (layer 3). Permiten ruteo entre LAN’s
8. Puertos MDI⁴/MDIX, en la actualidad los switches de medianas prestaciones permiten que los puertos cambien electrónicamente de estado, sin necesidad de cambiar el cable de red. Para ello, un puerto de un switch se va a conectar a un puerto de otro switch, electrónicamente cambia al estado MDI.
9. Soporte de activación del protocolo de Spanning Tree (enlaces redundantes)
10. Agregación de Puertos o enlaces (IEEE 802.3ad). La agregación de enlaces (Figura 7.4.2.5), es una forma económica de instalar una red de alta velocidad más rápida de lo que permita un solo puerto o dispositivo de la tecnología de que se disponga. Básicamente consiste en agrupar varios puertos de dispositivos que trabajan simultáneamente a su velocidad máxima como si fuera un único enlace de mayor capacidad. Por ejemplo, imagine que tiene que interconectar dos switches (SW1 y SW2) de 48 puertos cada switch (cada puerto trabaja en 1 Gigabit de velocidad, con capacidad full duplex). El enlace entre el SW1 y el SW2 lo establece usando un solo puerto de cada dispositivo. La máxima velocidad de transferencia teórica posible en ese enlace es 2 Gbps (1 Gbps full duplex). Cuando la red está en

⁴ Interfaz Dependiente del Medio (MDI en inglés: Medium Dependent Interface). En los concentradores (hubs) y conmutadores (switches) las interfaces MDI se usan para conectar a otros hubs o switches sin el cable de red cruzado

producción detecta que hay un cuello de botella en el enlace entre los SW1 y SW2. Gracias al protocolo 802.3ad, se puede agrupar “x” números de puertos para cada switch y generar un enlace de mayor ancho de banda. Imagine que configura cuatro puertos de cada switch en el modo “agregación de enlace”, en ese caso la ruta que une el SW1 y SW2 podrá traficar datos a 8 Gbps (4 Gbps, en modo full duplex)

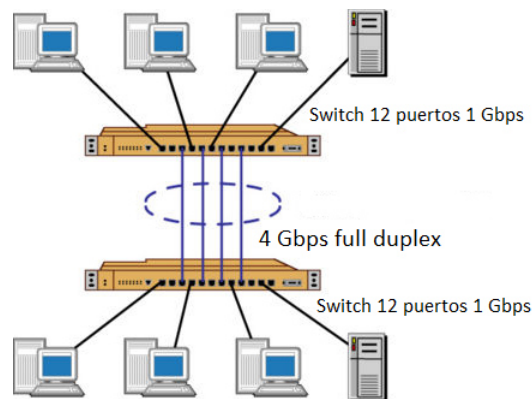


Figura 7.4.2.5: Agregación de enlaces 802.3ad

11. PoE (Power over Ethernet) IEEE 802.3af. La alimentación a través de Ethernet (Power over Ethernet, PoE) es una tecnología que incorpora alimentación eléctrica a una infraestructura LAN estándar.
12. Espejado de puerto (Port Mirroring): esta es una funcionalidad del switch por la cual se puede configurar un puerto espejo de otro. El puerto espejo (port mirroring) es definido sobre un puerto del switch para monitorear un segundo puerto. De esta forma, el primero recibe las copias de todas las tramas que “pasan” por el puerto a ser monitoreado. Esto es comúnmente utilizado para aplicaciones de red que requieren monitorear el tráfico de la red, tal como un IDS (Intrusion Detection System).
13. QoS (Quality of Service) IEEE 802.1p: Otra funcionalidad con la que puede contar un switch es el soporte para administrar tráfico con distintas prioridades. QoS es un estándar que proporciona priorización de tráfico y filtrado multicast dinámico. Esencialmente, proporciona un mecanismo para implementar Calidad de Servicio (QoS) a nivel de MAC (Media Access Control). Por ejemplo, cuando se configura una red convergente (red que trafica todo tipo de datos) es necesario que los datos que transportan voz o video tengan una prioridad superior con respecto a los otros tipos de datos. Esta prioridad superior, que está definida en la trama, le indica al switch, que la misma debe tener preferencia en la cola de tramas (una analogía de la vida real puede describirse con la prioridad que puede tener una mujer embarazada en la cola de cualquier institución)
14. Funcionalidad de capa 3 (switches que tienen funciones de ruteo): Son los conmutadores que, además de las funciones tradicionales de la capa 2, incorporan algunas funciones de enrutamiento o routing, como por ejemplo la determinación del camino basado en informaciones de capa de red (capa 3 del modelo OSI), validación de la integridad del cableado de la capa 3 por checksum y soporte a los

protocolos de routing tradicionales (RIP, OSPF⁵, etc). Los conmutadores de capa 3 soportan también la definición de redes virtuales (VLAN), y según modelos posibilitan la comunicación entre las diversas VLAN sin la necesidad de utilizar un router externo. Por permitir la unión de segmentos de diferentes dominios de difusión o broadcast, los switches de capa 3 son particularmente recomendados para la segmentación de redes LAN muy grandes, donde la simple utilización de switches de capa 2 provocaría una pérdida de rendimiento y eficiencia del ADSL, debido a la cantidad excesiva de broadcasts.

Tipos de Switches

En la bibliografía existen distintas taxonomías acerca de los tipos de switch; una interesante aproximación es la siguiente clasificación:

- Switches de escritorio
- Switches de grupo de trabajo o perimetrales
- Switches troncales de prestaciones medias
- Switches troncales de altas prestaciones

Switches de Escritorio: Este es el tipo de switch más básico que ofrece la función de conmutación básica sin ninguna característica adicional. Su uso más habitual es en redes de ámbito doméstico o en pequeñas empresas para la interconexión de unos pocos equipos, por lo que no están preparados para su montaje en rack 19''. Estos switches no requieren ningún tipo de configuración, ya que utilizan el modo de autoconfiguración de Ethernet para configurar los parámetros de cada puerto. Las características más habituales en este tipo son:

- ✓ Número de puertos: 4 -8 puertos RJ-45.
- ✓ Configuración de los puertos: normalmente admiten 10BASE-T y 100BASE-TX tanto en modo half-dúplex como full-dúplex. Su configuración se lleva a cabo por negociación mediante la característica de autonegociación que proporciona el estándar IEEE 802.3.

Switches de grupo de trabajo o perimetrales: este tipo de dispositivo puede ser no administrable o administrable.

- ✓ Switches no administrables: Este tipo de switches se utilizan habitualmente para constituir redes de pequeño tamaño de prestaciones medias. No admiten opciones de configuración y suelen tener características similares a los switches desktop, pero incrementando el número de puertos y ofreciendo la posibilidad de montaje en

⁵ El Protocolo de Información de Encaminamiento, Routing Information Protocol (RIP), es un protocolo utilizado por los routers o encaminadores para intercambiar información acerca de redes del Internet Protocol (IP) a las que se encuentran conectados. Open Shortest Path First (OSPF), Abrir el camino más corto primero en español, es un protocolo de red para encaminamiento jerárquico de pasarela interior o Interior Gateway Protocol (IGP), que usa el algoritmo Dijkstra, para calcular la ruta más corta entre dos nodos.

rack 19''. El número de puertos de este tipo de switch puede ser típicamente de 4, 8, 16 o 24 puertos.

- Suelen ofrecer puertos con distintas velocidades (10/100/1000), siempre con interface RJ-45, lo cuales admiten autonegociación y Auto MDI/MDI-X.
 - En algunos casos pueden presentar puertos adicionales de rendimiento superior al resto de puertos.
 - Existen modelos no gestionables que proporcionan Power Over Ethernet (PoE).
 - Preparados para su montaje en rack de 19''.
- ✓ **Switches Administrables:** Este tipo se utiliza para la conexión de los equipos de los usuarios en redes de tamaño medio y grande, y se localizan en el nivel jerárquico inferior. Es necesario que estos switches ofrezcan características avanzadas de configuración y gestión. Sus características más habituales son:
- El número de puertos fijos que ofrecen oscila entre 16 y 48 puertos.
 - Existen modelos con puertos 10/100 y otros con puertos 10/100/1000, todos con soporte Auto MDI/MDI-X.
 - Incluyen puertos adicionales de mayores prestaciones o puertos modulares (GBIC o SFP⁶) para la conexión con un switch troncal.
 - Características avanzadas de gestión por SNMP, puerto de consola, navegador web, ssh, monitorización Port Mirroring (espejado de puertos).
 - Características avanzadas de configuración en el nivel 2 como Port Trunking, Spanning Tree, IEEE 802.1x, QoS, VLAN, soporte de tramas Jumbo, etc.
 - Algunos modelos pueden ofrecer Power Over Ethernet en todos los puertos.

Switches Troncales de prestaciones medias: Este tipo de switches están diseñados para formar el núcleo o troncal de una red de tamaño medio. Proporcionan altas prestaciones y funcionalidades avanzadas. Una de las principales diferencias con los switches perimetrales es que ofrecen características de nivel 3 como enrutamiento IP. A continuación, se exponen sus características más representativas:

- ✓ Características avanzadas de configuración de nivel 2 similares a los switches perimetrales gestionables.
- ✓ Habitualmente ofrecen entre 24 y 48 puertos fijos 10/100 con conector RJ-45 con algunos puertos modulares adicionales para Gigabit Ethernet y 10GbE para cable y fibra. Existen también modelos con puertos de altas prestaciones 10/100/1000 o incluso puertos 10GbE.

⁶ Un transceptor SFP, del inglés small form-factor pluggable transceptor (en español transceptor pequeño de factor y forma conectable) o, también en inglés, SFP transceptor y de forma abreviada conocido como SFP, es dispositivo que permite conectar redes fibra óptica usando distintos estándares.

- ✓ Permiten expandir sus capacidades mediante el apilamiento de switches.
- ✓ Niveles 2/3. Además de cubrir funciones de conmutación avanzadas del nivel 2 también proporcionan funciones de enrutamiento y gestión en el nivel 3.

Switches Troncales de altas prestaciones: La principal característica de este tipo, además de su alto rendimiento, es su alta modularidad. El formato habitual es de tipo chasis donde se instalan los módulos que se necesitan. Se utilizan en grandes redes corporativas o de campus, e incluso se utilizan por los operadores para constituir sus redes metropolitanas. Sus principales características son:

- ✓ Altamente modulares mediante un chasis con un número variable de slots donde se insertan módulos con los elementos requeridos. Normalmente suelen admitir la inserción de módulos “en caliente” (hot swappable) de forma que no hay que desconectar el switch para realizar dicha operación, garantizando así una alta disponibilidad.
- ✓ Niveles 2/3/4. Además de cubrir funciones de conmutación avanzadas del nivel 2 también proporcionan funciones de enrutamiento y gestión en los niveles 3 y 4.
- ✓ Fuentes de alimentación redundantes.
- ✓ Admiten módulos con todos los tipos de puertos, tanto de cobre como de fibra con velocidades 10/100/1000 Mbps hasta 10, 40 o inclusive 100 Gbps.
- ✓ Alta densidad de puertos. Pueden llegar a más de 500 puertos 10/100, hasta 200 puertos Gigabit o sobre unos 25 puertos 10GbE.
- ✓ Características avanzadas de configuración y gestión en el nivel 2.
- ✓ Enrutamiento en el nivel 3 (IPv4 e IPv6).

A continuación, se brinda una descripción de un chasis de altas prestaciones que puede ser instalado en el “core” de una gran red (grandes empresas, organismos gubernamentales que requieren altas prestaciones, o en un proyecto de Datacenter para ofrecer servicios en la nube). Se trata del Chasis Aruba 8400 (Figura 7.4.2.6), un ejemplo de muy buenas prestaciones y performance al momento de escribir las presentes notas.



Figura 7.4.2.6: Switch de chasis Aruba 8400 (JL375A/JL376A)

Este chasis proporciona una capacidad de conmutación de hasta 19.2 Tbps con hasta 7.142 mil millones de paquetes por segundo (BPPS) para rendimiento; toda la conmutación y enrutamiento se realiza en los módulos de E / S; Cumple con las demandas de las aplicaciones intensivas de ancho de banda hoy y en el futuro:

- ✓ Módulos que soporta:
 - Aruba 8400X 32-port 10GbE SFP/SFP+ with MACsec Advanced Module (JL363A)
 - Aruba 8400X 8-port 40GbE QSFP+ Advanced Module (JL365A)
 - Aruba 8400X 6-port 40GbE/100GbE QSFP28 Advanced Module (JL366A)
 - Aruba 8400X-32Y 32-port 1/10/25G SFP/SFP+/SFP28 Module (JL687A)
- ✓ Accesorios:
 - Aruba 8400X 7.2Tbps Fabric Module (JL367A)
 - Aruba 8400 Management Module (JL368A)
 - Aruba X731 Fan Tray (JL369A)
 - Aruba 8400 Fan for X731 Fan Tray (JL370A)
 - Aruba 8400 1 Fan Tray and 6 Fans Bundle (JL371A)

7.5. Apéndice A: Protocolos de control de enlace de datos: Control de Flujo y Control de Errores, Protocolo HDLC

Las técnicas de sincronización y gestión de la interfaz resultan insuficientes para dar respuesta a la potencial aparición de errores en una transmisión y a la posible necesidad de regulación de la velocidad de datos por parte del receptor. Es necesario, por tanto, incluir en cada dispositivo de comunicación una capa de control que regule el flujo de información, además de detectar y controlar los errores. En el modelo LAN, entre otras funciones, la capa LLC es la encargada de llevar a cabo las tareas antes mencionadas. En la arquitectura del modelo OSI esas tareas son inherentes a la capa 2: Enlace de Datos.

El control de flujo permite al receptor regular el flujo de los datos enviados por el emisor, de manera que la memoria temporal del primero no se desborde.

En un protocolo de control del enlace de datos, el control de errores se lleva a cabo mediante la retransmisión de las tramas dañadas que no hayan sido confirmadas o de aquellas para las que el otro extremo solicite su retransmisión.

7.5.1. Control de Flujo

El control de flujo es una técnica utilizada para asegurar que una entidad transmisora no sobrecargue a la entidad receptora con una excesiva cantidad de datos. Generalmente, la entidad receptora reserva una zona de memoria temporal para la transferencia. Cuando se reciben los datos, el receptor debe realizar cierta cantidad de procesamiento antes de pasar los mismos al software de las capas superiores. En ausencia de procedimientos para el control de flujo, la memoria temporal del receptor se podría llenar y desbordar, mientras éste se encuentra procesando datos previos.

Se inicia el análisis estudiando el control de flujo en ausencia de errores. El modelo a usar se muestra en la Figura 7.5.1.1, consistente en un diagrama donde el tiempo se representa sobre la vertical. Este diagrama es útil en cuanto que muestra las dependencias temporales y proporciona de forma adecuada la relación existente entre el emisor y el receptor. Cada flecha representa una única trama que transita por el enlace de datos establecido entre dos estaciones. Los datos se envían en base a una secuencia de tramas, en la que cada una de ellas contiene un campo de datos más información de control.

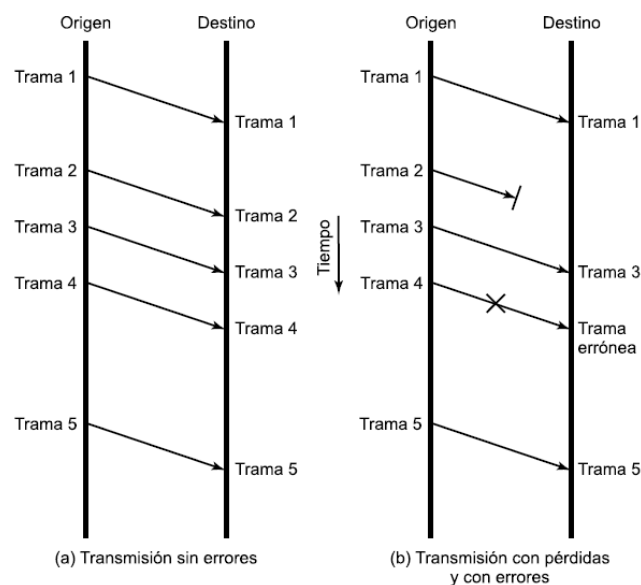


Figura 7.5.1.1: Modelo de transmisión de tramas

Se define el tiempo de transmisión como el tiempo empleado por una estación para emitir todos los bits de una trama sobre el medio; este tiempo es proporcional a la longitud de la trama. Se define el tiempo de propagación como el tiempo empleado por un bit en atravesar el medio de transmisión desde el origen hasta el destino. Por ahora, supondremos que todas las tramas que se transmiten se reciben con éxito; ninguna trama se pierde y ninguna llega con errores. Es más, las tramas llegan en el mismo orden en que fueron transmitidas. No obstante, cada trama transmitida sufrirá un retardo arbitrario y variable antes de ser recibida.

Control de Flujo mediante parada y espera

El procedimiento más sencillo para controlar el flujo, denominado control de flujo mediante parada y espera, funciona de la siguiente manera: una entidad origen transmite una trama; tras la recepción, la entidad destino indica su deseo de aceptar otra trama mediante el envío de una confirmación de la trama que acaba de recibir; el origen debe esperar a recibir la confirmación antes de proceder a la transmisión de la trama siguiente. De este modo, el destino puede parar el flujo de los datos sin más que retener las confirmaciones. Este procedimiento funciona adecuadamente y, de hecho, es difícil mejorar sus prestaciones cuando el mensaje se envía usando un número reducido de tramas de gran tamaño. No obstante, es frecuente que el origen segmente la información en bloques pequeños, transmitiendo los datos en varias tramas. Esto se hace así por las siguientes razones:

- El tamaño de la memoria temporal del receptor puede ser limitado.
- Cuanto más larga sea la transmisión, es más probable que haya errores, precisándose en tal caso la retransmisión de la trama completa. Si se usan tramas más pequeñas, los errores se detectarán antes y, en consecuencia, se necesitará retransmitir una cantidad de datos menor.
- En un medio compartido, como por ejemplo una LAN, es frecuente que no se permita que una estación ocupe el medio durante un periodo de tiempo largo, evitándose así que las otras estaciones transmisoras sufran grandes retardos.

Si se usan varias tramas para un solo mensaje, puede resultar inadecuado el empleo del procedimiento de parada y espera. Esencialmente, el problema radica en que sólo puede haber una trama en tránsito en un instante de tiempo dado. Para explicar este hecho definamos la longitud de un enlace en bits como:

$$B = R \times d / V$$

Donde B = longitud del enlace en bits; es decir, el número de bits presentes en el enlace cuando una secuencia de ellos lo ocupa completamente.

R = velocidad del enlace, en bps.

d = longitud, o distancia, del enlace en metros.

V = velocidad de propagación, en m/s.

Veamos el problema de performance que puede tener el mecanismo de parada y espera: Se considera un enlace de fibra óptica de 200 metros a 1 Gbps. La velocidad de propagación en la fibra óptica es, generalmente, del orden de 2×10^8 m/s. Haciendo uso de la ecuación anterior, $B = (10^9 \times 200) / (2 \times 10^8) = 1.000$. Supóngase la transmisión de una trama de 1.000 bytes, u 8.000 bits. Haciendo uso de la ecuación, $\alpha = B/L$, donde L es la longitud de la trama en bits, $\alpha = 1000/8000$, esto es 0,125. Tomando como base el razonamiento que la transmisión comienza en t_0 . Tras 1 μ s (un tiempo normalizado de 0,125 intervalos de trama), el inicio de la trama (primer bit) ha llegado a R y los 1.000 primeros bits de la trama se encuentran ya sobre el enlace. En $t=8 \mu$ s, el final de la trama (último bit) acaba de ser emitido por T y los 1.000 últimos bits de la trama se encuentran sobre el enlace. En $t=9 \mu$ s, el bit final de la trama llega a R, el cual procederá a devolver una trama ACK. Si suponemos despreciable el tiempo de transmisión de la trama

ACK (la cual es muy pequeña) y que ésta se envía inmediatamente, el ACK llega a T en $t=10\ \mu\text{s}$. Llegados a este punto, T puede comenzar a transmitir una nueva trama. El tiempo de transmisión real de la trama es $8\ \mu\text{s}$, pero el total de su transmisión y recepción del ACK es $10\ \mu\text{s}$.

Se considera ahora un enlace de 1 Mbps entre dos estaciones terrestres que se comunican vía satélite. Un satélite geoestacionario está situado a una altura aproximada de 36.000 km, por lo que $B = (10^6 \times 2 \times 36.000.000) / (3 \times 10^8) = 240.000$. Para una trama de 8.000 bits de longitud, $\alpha = (240.000/8.000) = 30$. Tomando como base el razonamiento anterior, resulta que se necesita un tiempo igual a 240 ms para que el inicio de la trama se reciba y 8 ms adicionales para el resto de la trama. Por su parte, la trama ACK llega a T en $t = 488\ \text{ms}$. El tiempo de transmisión real para la primera trama es de 8 ms, pero el total involucrado en su transmisión y en la recepción del ACK es 488 ms.

Control de flujo mediante ventana deslizante

El problema comentado con anterioridad radica básicamente en el hecho de que sólo puede haber en tránsito una trama a la vez. En todas aquellas situaciones en las que la longitud del enlace en bits sea mayor que la longitud de la trama ($\alpha > 1$), aparecerán problemas graves de ineficiencia. Si se permite que transiten varias tramas al mismo tiempo sobre el enlace, la eficiencia mejorará significativamente.

Se verá cómo funcionaría este procedimiento para dos estaciones, A y B, conectadas mediante un enlace full-duplex. La estación B reserva memoria temporal suficiente para almacenar W tramas. Por tanto, B puede aceptar W tramas, permitiéndosele a A enviar este mismo número de tramas sin tener que esperar ninguna confirmación. Para saber qué tramas se han confirmado, cada una de ellas se etiqueta con un número de secuencia. B confirma una trama mediante el envío de una confirmación que incluye el número de secuencia de la siguiente trama que se espera recibir. Esta confirmación informa también, implícitamente, acerca de que B está preparado para recibir las W tramas siguientes, comenzando por la de número especificado. Este esquema se puede utilizar también para confirmar varias tramas simultáneamente. Por ejemplo, B podría recibir las tramas 2, 3 y 4, pero retener la confirmación hasta que llegase la trama 4. Al devolver una confirmación con número de secuencia 5, B confirma simultáneamente las tramas 2, 3 y 4. A mantiene una lista con los números de secuencia que se le permite transmitir y B mantiene una lista con los números de secuencia que está esperando recibir... Cada una de estas listas se puede considerar como una ventana de tramas, de ahí que este procedimiento se denomine control de flujo mediante ventana deslizante (sliding-window flow control).

Es necesario hacer algunos comentarios adicionales. Debido a que la numeración de las tramas ocupa un campo en las mismas, es evidente que dicha numeración tendrá un tamaño limitado. Por ejemplo, si se considera un campo de 3 bits, los números de secuencia pueden variar entre 0 y 7. Por consiguiente, las tramas se numerarán módulo 8; es decir, después del número 7 vendrá el 0. En general, para un campo de k bits el rango de números de secuencia irá desde 0 hasta 2^{k-1} , numerándose las tramas módulo 2^k . Como se verá más adelante, el tamaño máximo de la ventana es 2^{k-1} .

Teniendo esto en cuenta, la Figura 7.5.1.2 muestra una forma útil de representar el procedimiento de ventana deslizante. En esta figura se consideran números

de secuencia de 3 bits, por lo que las tramas se numerarán secuencialmente desde 0 a 7, utilizando los mismos números cíclicamente para las tramas sucesivas. El rectángulo sombreado indica las tramas que se pueden transmitir; en el ejemplo de la figura el emisor puede transmitir cinco tramas, comenzando por la 0. Cada vez que se envíe una trama, la ventana sombreada se cerrará, reduciendo su tamaño; cada vez que se reciba una confirmación, la ventana sombreada se abrirá. Las tramas comprendidas entre la barra vertical y la ventana sombreada han sido ya enviadas, pero aún no han sido confirmadas. Como se verá posteriormente, el emisor debe almacenar estas tramas en la memoria temporal por si hubiera que retransmitirlas.

Dada una longitud para los números de secuencia, el tamaño de la ventana real no necesita ser el máximo posible. Por ejemplo, si se usan números de secuencia de 3 bits, se podría configurar un tamaño para la ventana igual a 4 para las estaciones que utilicen el protocolo de ventana deslizante.

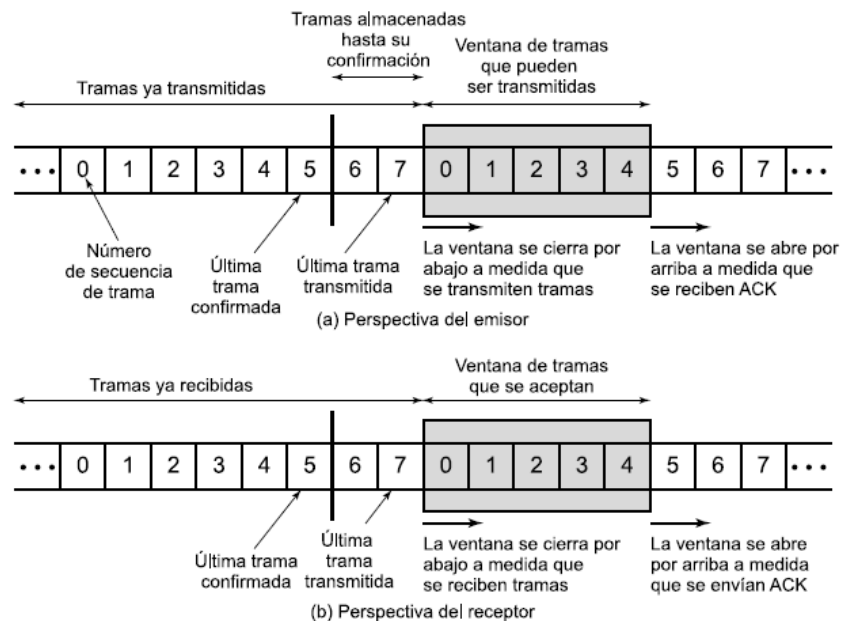


Figura 7.5.1.2: Esquema de ventana deslizante

En la Figura 7.5.1.3 se muestra un ejemplo en el que se supone un campo de 3 bits para los números de secuencia y un tamaño máximo para la ventana igual a siete tramas. Inicialmente, A y B tienen las ventanas indicando que A puede transmitir siete tramas, comenzando con la 0 (F0). Tras transmitir tres tramas (F0, F1, F2) sin confirmación, A habrá cerrado su ventana hasta tener un tamaño de cuatro tramas, manteniendo una copia de las tres tramas transmitidas. La ventana indica que A puede transmitir cuatro tramas, comenzando por la trama número 3. B transmite entonces una trama RR (receptor preparado, Receive Ready) 3, lo que significa, “he recibido todas las tramas hasta la trama número 2 y estoy preparado para recibir la trama número 3”; de hecho, estoy preparado para recibir siete tramas, comenzando por la trama número 3. Tras

ello, a la estación A se le permite transmitir siete tramas, comenzando por la trama 3; A también puede descartar las tramas almacenadas en la memoria temporal que acaban de ser confirmadas. A pasa a transmitir las tramas 3, 4, 5 y 6. B devuelve una RR 4, con la que confirma F3 y permite la posterior transmisión de la trama F4 y siguientes, hasta la F2. Cuando la trama RR llega a A, éste ya ha transmitido F4, F5 y F6, por lo que A sólo abre su ventana para permitir la transmisión de cuatro tramas a partir de la F7.

El mecanismo que se ha descrito proporciona un procedimiento para controlar el flujo: el receptor sólo acepta las siete tramas siguientes a la última que ha confirmado. La mayoría de los protocolos permiten también que una estación pueda interrumpir totalmente la transmisión de tramas desde el otro extremo mediante el envío de un mensaje RNR (receptor no preparado, Receive Not Ready), con el que se confirman las tramas anteriores, pero se prohíbe la transmisión de tramas adicionales. Así, RNR 5 significa: “he recibido todas las tramas hasta la trama número 4, pero no acepto más”. En algún momento posterior, la estación deberá transmitir una confirmación normal que “reabra” la ventana.

Hasta ahora hemos considerado la transmisión de tramas en una sola dirección. Si dos estaciones intercambian datos, cada una de ellas deberá mantener dos ventanas, una para transmitir y otra para recibir, y cada extremo deberá enviar hacia el otro tanto datos como confirmaciones. Para llevar a cabo esto de forma eficiente se utiliza un procedimiento denominado “incorporación de confirmación” (piggybacking en inglés). Cada trama de datos incluye un campo en el que se indica el número de secuencia de dicha trama más un campo que indica el número de secuencia que se confirma. Por tanto, si una estación tiene para enviar una confirmación además de datos, lo hará conjuntamente utilizando una sola trama, ahorrando así capacidad del canal. Por supuesto, si una estación tiene que enviar una confirmación, pero no tiene datos, se enviará una trama de confirmación, como por ejemplo una RR o una RNR. Si la estación tiene datos para enviar, pero nada que confirmar, deberá repetir el último número de secuencia de confirmación enviado con anterioridad. Esto se debe a que en la trama de datos se prevé un campo para el número de confirmación y, por tanto, habrá que especificar algún valor en el mismo. Cuando una estación reciba una confirmación repetida, simplemente la ignorará.

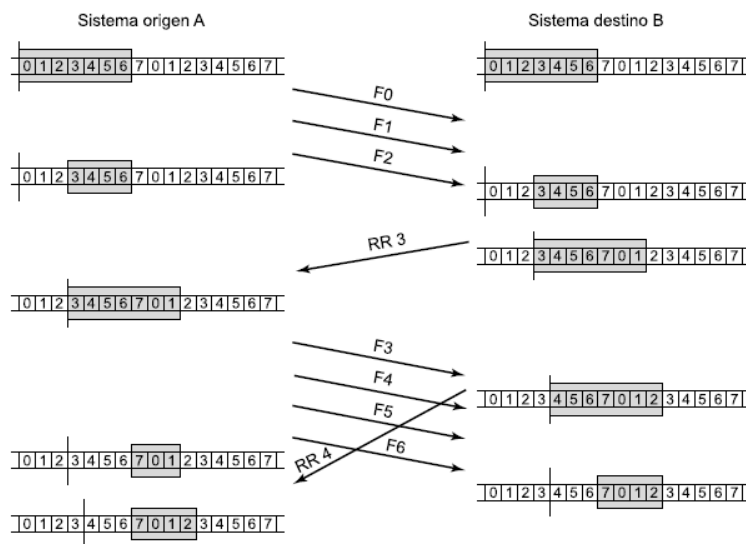


Figura 7.5.1.3: Ejemplo de transmisión con una ventana de 8 bits

El control de flujo mediante ventana deslizante es potencialmente mucho más eficiente que el control de flujo mediante un procedimiento de parada y espera.

7.5.2. Control de Errores

El control de errores hace referencia a los mecanismos necesarios para la detección y la corrección de errores que aparecen en una transmisión de tramas. Se contemplan dos tipos de errores potenciales:

- Tramas perdidas: se produce cuando una trama enviada no llega al otro extremo. Así, por ejemplo, una ráfaga de ruido puede dañar una trama de manera que el receptor no se percate siquiera de su transmisión.
- Tramas dañadas: ocurre cuando una trama se recibe con algunos bits erróneos (modificados durante la transmisión).

Las técnicas más usuales para el control de errores se basan en algunas o todas las siguientes aproximaciones:

- Detección de errores, utilizando el algoritmo correspondiente sobre el campo CRC (verificación de redundancia cíclica)
- Confirmaciones positivas: el destino devuelve una confirmación positiva por cada trama recibida con éxito, libre de errores.
- Retransmisión tras la expiración de un temporizador: la fuente retransmite las tramas que no se han confirmado tras un periodo de tiempo predeterminado.
- Confirmación negativa y retransmisión: el destino devuelve una confirmación negativa para aquellas tramas en las que se detecta la ocurrencia de errores. El origen retransmitirá de nuevo dichas tramas.

Estos mecanismos se denominan genéricamente solicitud de repetición automática (ARQ, Automatic Repeat reQuest); el objetivo de un esquema ARQ es convertir un enlace de datos no fiable en fiable. Hay tres variantes ARQ estandarizadas:

- ARQ con parada y espera.
- ARQ con vuelta atrás N.
- ARQ con rechazo selectivo.

ARQ con parada y espera

El esquema ARQ con parada y espera se basa en la técnica para el control de flujo mediante parada y espera estudiada con anterioridad. La estación origen transmite

una única trama y debe esperar la recepción de una confirmación (ACK). No se podrá enviar ninguna otra trama hasta que la respuesta de la estación destino llegue al emisor.

Pueden ocurrir dos tipos de error. El primero consiste en que la trama que llega al destino puede estar dañada. El receptor detecta este hecho mediante la utilización de técnicas de detección de errores y, simplemente, descartará la trama. Para dar respuesta a esta situación, la estación fuente utiliza un temporizador. De este modo, tras el envío de una trama, la estación espera la recepción de una confirmación; si no se recibe ninguna confirmación antes de que el temporizador expire, se procederá a reenviar la misma trama. Obsérvese que este método exige que el emisor conserve una copia de la trama transmitida hasta que se reciba la confirmación correspondiente.

El segundo tipo de error se refiere a una trama de confirmación deteriorada. Considérese la siguiente situación. Una estación A envía una trama, que se recibe correctamente en una estación B, la cual responde con una confirmación (ACK). La trama ACK se deteriora en el camino, de modo que no es identificable por A, por lo que se producirá una expiración del temporizador y se reenviará la misma trama de datos. Esta trama duplicada llega y se acepta por B. Así pues, B ha aceptado dos copias de la misma trama como si fueran distintas. Para evitar este problema, las tramas se pueden etiquetar de forma alternada con 0 o 1, siendo las confirmaciones positivas de la forma ACK0 y ACK1. Para mantener las convenciones adoptadas en el procedimiento de ventana deslizante, una trama ACK0 confirma la recepción de la trama numerada como 1 e indica que el receptor está preparado para aceptar la trama numerada como 0.

En la Figura 7.5.2.1 se muestra un ejemplo acerca de la utilización del esquema ARQ con parada y espera; en ella se ilustra la transmisión de una secuencia de tramas desde un origen A, con un destino B. La figura muestra los dos tipos de error que se han comentado previamente. La tercera trama transmitida por A se daña o se pierde, por lo que B no devuelve ninguna trama ACK. En A se produce la expiración del temporizador y se retransmite la trama. Posteriormente, A transmite una trama etiquetada con 1 pero se pierde su correspondiente ACK0. El temporizador en A expira y se retransmite la trama. Cuando B recibe dos tramas consecutivas con la misma etiqueta, descarta la segunda, pero devuelve una trama ACK0 para cada una de ellas.

La principal ventaja del esquema ARQ con parada y espera es su sencillez. Su desventaja más importante ya se discutió, y no es otra que el procedimiento parada y espera es ineficiente. Para conseguir una utilización más eficiente de la línea se puede hacer uso de las técnicas de control de flujo mediante ventana deslizante, a las cuales se les suele referir como ARQ continua.

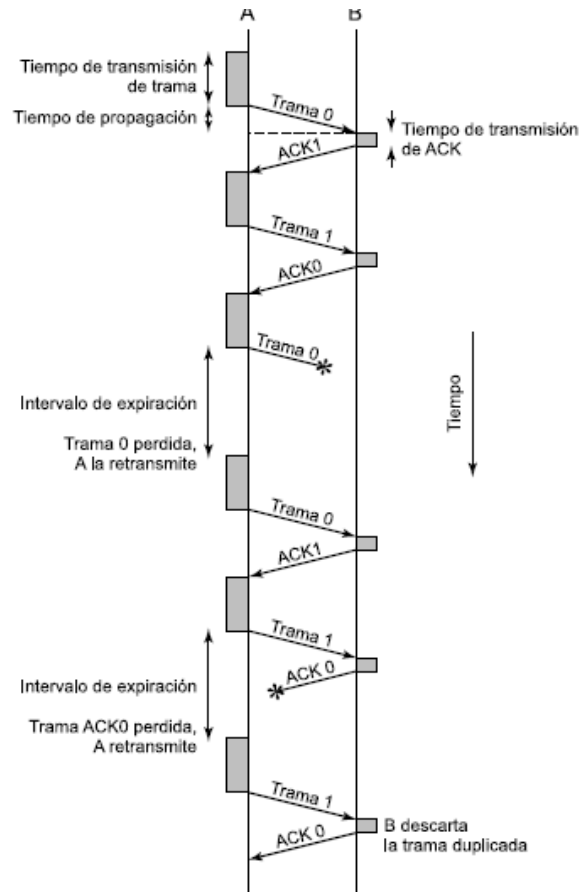


Figura 7.5.2.1: Control de errores con parada y espera

ARQ con vuelta atrás N

La técnica de control de errores basada en el control de flujo mediante ventana deslizante más frecuentemente usada se denomina ARQ con vuelta atrás N. En esta técnica, una estación puede enviar una serie de tramas numeradas secuencialmente módulo "algún valor máximo dado". Al utilizar la técnica de control de flujo mediante ventana deslizante, el número de tramas pendientes de confirmar se determina mediante el tamaño de la ventana. Mientras no se produzcan errores, el destino confirmará las tramas recibidas como es habitual mediante una trama RR (Receive Ready) o mediante la técnica de incorporación de confirmación, piggybacking. Si la estación destino detecta un error en una trama, puede llevar a cabo el envío de una confirmación negativa (REJ, REJect) para dicha trama de la siguiente forma: la estación destino descartará esa trama y todas las que se reciban con posterioridad hasta que dicha trama errónea llegue correctamente. Así, cuando la estación origen reciba un REJ, deberá retransmitir la trama errónea además de todas las posteriores que hayan sido transmitidas tras ella.

Considérese que una estación A envía tramas a una estación B. Después de cada transmisión, A inicia un temporizador para la confirmación de la trama que se acaba

de enviar. Supóngase que B ha recibido la trama ($i - 1$) sin errores y que A acaba de enviar la trama i . La técnica vuelta atrás N tiene en cuenta las siguientes contingencias:

1. Trama deteriorada. Si la trama recibida no es válida (es decir, B detecta un error en ella o la trama está tan dañada que B ni siquiera detecta su recepción), B descartará dicha trama sin más. Llegados a este punto se plantean dos posibilidades:
 - a) A envía la trama ($i + 1$) dentro de un periodo de tiempo razonable. B recibe la trama ($i + 1$) fuera de orden y envía una REJ i . A debe retransmitir la trama i y todas las posteriores.
 - b) A no envía tramas adicionales en un breve espacio de tiempo. B no recibe nada, por lo que ni devuelve una trama RR ni una REJ. Cuando el temporizador de A expira, esta estación transmite una trama RR que incluye un bit denominado P, que estará puesto a 1. B interpreta la trama RR con el bit P igual a 1 como si fuera una orden que debe ser confirmada mediante el envío de una trama RR para indicar la siguiente trama que se espera recibir, la i . Cuando A recibe la trama RR, retransmite la trama i . Esta retransmisión por parte de A puede realizarse también ante la expiración de su temporizador.
2. Trama RR deteriorada. Existen dos casos posibles:
 - a) B recibe la trama i y envía una RR ($i + 1$), que sufre un error en el camino. Dado que las confirmaciones son acumulativas (por ejemplo, RR 6 significa que se confirman todas las tramas hasta la 5), puede ocurrir que A reciba después una RR correspondiente a una trama posterior y que llegue antes de que el temporizador asociado a la trama i expire.
 - b) Si el temporizador de A expira, dicha estación transmite una orden RR, como en el caso 1.b. A inicia otro temporizador, denominado temporizador del bit P. Si B no responde a la orden RR, o si la respuesta se deteriora a lo largo de su transmisión, entonces el temporizador del bit P en A expirará. En este caso A lo intentará de nuevo enviando otra orden RR, reiniciando el temporizador del bit P. Este procedimiento se repite una serie de veces. Si A no recibe la confirmación tras un número máximo de intentos, comenzará un procedimiento de reinicio.
3. Trama REJ deteriorada. La pérdida de una trama REJ es equivalente al caso 1b.

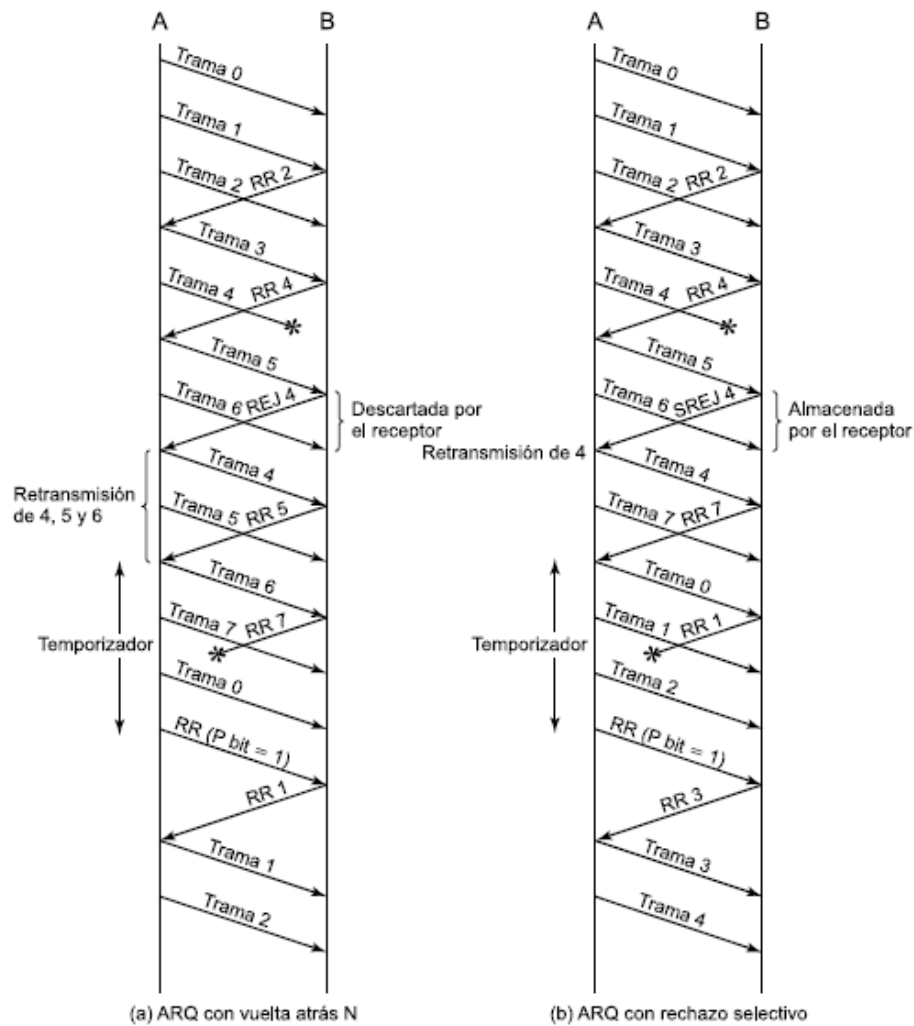


Figura 7.5.2.2: Protocolo ARQ usando ventana deslizante

La Figura 7.5.2.2(a) es un ejemplo del flujo de tramas para un esquema ARQ con vuelta atrás N. Debido al retardo de propagación en la línea, mientras que la confirmación (positiva o negativa) vuelve a la estación emisora, se habrá enviado, al menos, una trama adicional tras la primera que está siendo confirmada. En este ejemplo se deteriora la trama 4. Las tramas 5 y 6 se reciben fuera de orden y son descartadas por B. Cuando llega la trama 5, B envía inmediatamente una trama REJ 4. Al recibirse esta trama en el emisor, éste debe retransmitir no sólo la 4, sino también la 5 y la 6. Obsérvese que el emisor debe conservar una copia de todas las tramas que haya enviado y que no estén confirmadas.

Cuando se explicó el control de flujo mediante ventana deslizante, se mencionó que, si se dispone de un campo de k bits para los números de secuencia, lo que permitiría un rango para éstos igual a 2^k , el tamaño máximo de la ventana estará limitado a 2^{k-1} . Esto se debe a la interacción entre los procedimientos para el control de errores y las confirmaciones. Téngase en cuenta que, si los datos se están transmitiendo en ambos sentidos, la estación B debe enviar las confirmaciones correspondientes a las tramas enviadas por A dentro de sus propias tramas de datos mediante la técnica de incorporación

de confirmaciones, incluso en el caso de que dichas confirmaciones hayan sido generadas ya con anterioridad. Como se ha mencionado, esto es debido a que B debe especificar algún valor en el campo previsto para las confirmaciones dentro de sus tramas de datos. A modo de ejemplo, supóngase que se utilizan números de secuencia de 3 bits (es decir, 8 números de secuencia). Supóngase que una estación envía la trama 0 y recibe de vuelta una RR 1; posteriormente envía las tramas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 0 y recibe otra RR 1. Esto podría significar que las 8 tramas se recibieron correctamente y que la RR 1 es una confirmación acumulativa. También podría interpretarse como que las 8 tramas se han deteriorado, o incluso perdido en el camino, y que la estación receptora está repitiendo la RR 1 anterior. Esta posible ambigüedad se evita si el tamaño máximo de la ventana se fija a 7 (es decir, 2^{3-1}).

ARQ con rechazo selectivo

En el esquema ARQ con rechazo selectivo, las únicas tramas que se retransmiten son aquellas para las que se recibe una confirmación negativa, denominada SREJ (Selective REJect) ahora, o aquellas para las que el temporizador correspondiente expira. En la Figura 7.5.2.2(b) se muestra este esquema. Cuando la trama 5 se recibe fuera de orden, B envía una SREJ 4, indicando que la trama 4 no se ha recibido. Sin embargo, B sigue aceptando tramas y las almacena en la memoria temporal hasta que se reciba correctamente la trama 4. Llegados a este punto, B podrá proporcionar al software de las capas superiores las tramas en el orden correcto.

El procedimiento de rechazo selectivo puede parecer más eficiente que el de vuelta atrás N, puesto que minimiza el número de retransmisiones. Por otra parte, el receptor debe mantener una zona de memoria temporal lo suficientemente grande para almacenar las tramas recibidas tras el envío de una SREJ hasta que la trama errónea se retransmita; además, debe tener lógica adicional para reinsertar la trama reenviada en la posición correspondiente. Del mismo modo, el transmisor necesita también una lógica más compleja para poder enviar tramas fuera de orden. Debido a estas complicaciones, el esquema ARQ con rechazo selectivo se utiliza mucho menos que el ARQ con vuelta atrás N, aunque suele emplearse en enlaces satélite debido al elevado retardo de propagación involucrado.

La limitación en el tamaño máximo de la ventana es más restrictiva en el caso del esquema de rechazo selectivo que en el de vuelta atrás N. Considérese el caso de un procedimiento de rechazo selectivo que utiliza 3 bits para los números de secuencia. Permítase un tamaño de ventana igual a 7 y ténganse en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La estación A envía las tramas desde la 0 hasta la 6 a la estación B.
2. La estación B recibe las siete tramas y las confirma acumulativamente mediante el envío de una trama RR 7.
3. Debido a una ráfaga de ruido, la trama RR 7 se pierde.
4. El temporizador de A expira y se retransmite la trama 0.

5. B ha desplazado su ventana de recepción indicando que acepta las tramas 7, 0, 1, 2, 3, 4 y 5. Al recibir la trama 0, supone que la 7 se ha perdido y que se trata de una trama 0 diferente, por lo que la acepta.

El problema aparecido en la casuística anterior se debe al solapamiento entre las ventanas de emisión y de recepción. Para evitar este problema, el tamaño máximo de la ventana no debería ser mayor que la mitad del rango de los números de secuencia. Así, en el escenario anterior se evitarían las ambigüedades si se permitiera que sólo estuvieran pendientes de confirmación 4 tramas. En general, para un campo de números de secuencia de k bits, es decir, para un rango igual a 2^k , el tamaño máximo de la ventana se limita a 2^{k-1} .

7.5.3. Control de enlace de datos de alto nivel (HDLC)

El protocolo de control del enlace de datos más importante es HDLC (High-level Data Link Control ISO 3009, ISO 4335). No sólo porque es ampliamente utilizado, sino también porque es la base de otros importantes protocolos de control del enlace, en los que se usan los mismos o similares formatos y los mismos procedimientos que los empleados en HDLC.

Características Básicas

Para satisfacer las demandas de diversas aplicaciones, HDLC define tres tipos de estaciones, dos configuraciones del enlace y tres modos de operación para la transferencia de los datos. Los tres tipos de estaciones son:

- ✓ Estación primaria: es la responsable de controlar el funcionamiento del enlace. Las tramas generadas por la estación primaria se denominan órdenes.
- ✓ Estación secundaria: funciona bajo el control de la estación primaria. Las tramas generadas por la estación secundaria se denominan respuestas. La primaria establece un enlace lógico independiente con cada una de las secundarias presentes en la línea.
- ✓ Estación combinada: combina las características de las primarias y de las secundarias, pudiendo generar tanto órdenes como respuestas.

Las dos posibles configuraciones del enlace son:

- ✓ Configuración no balanceada: está formada por una estación primaria y una o más secundarias. Permite tanto transmisión full-duplex como half-duplex.
- ✓ Configuración balanceada: consiste en dos estaciones combinadas. Permite igualmente transmisión full-duplex y half-duplex.

Los tres modos de transferencia de datos son:

- ✓ Modo de respuesta normal (NRM, Normal Response Mode): se utiliza en la configuración no balanceada. La estación primaria puede iniciar la transferencia de

datos hacia la secundaria, pero la secundaria sólo puede transmitir datos en base a respuestas a las órdenes emitidas por la primaria.

- ✓ Modo balanceado asíncrono (ABM, Asynchronous Balanced Mode): se utiliza en la configuración balanceada. En este modo, cualquier estación combinada puede iniciar la transmisión sin necesidad de recibir permiso por parte de la otra estación combinada. Es el modo más usado
- ✓ Modo de respuesta asíncrono (ARM, Asynchronous Response Mode): se utiliza en la configuración no balanceada. La estación secundaria puede iniciar la transmisión sin tener permiso explícito de la primaria. La estación primaria sigue teniendo la responsabilidad del funcionamiento de la línea, incluyendo la iniciación, la recuperación de errores y la desconexión lógica.

Estructura de Trama

HDLC emplea transmisión síncrona. Todos los intercambios se realizan en base a tramas, siendo suficiente un único formato de trama para todos los tipos de intercambios de datos e información de control.

En la Figura 7.5.3.1 se muestra la estructura de la trama HDLC. Los campos de delimitación, de dirección y de control, que preceden al campo de información, se denominan cabecera. Los campos FCS y de delimitación, que están a continuación del campo de datos, se denominan cola.

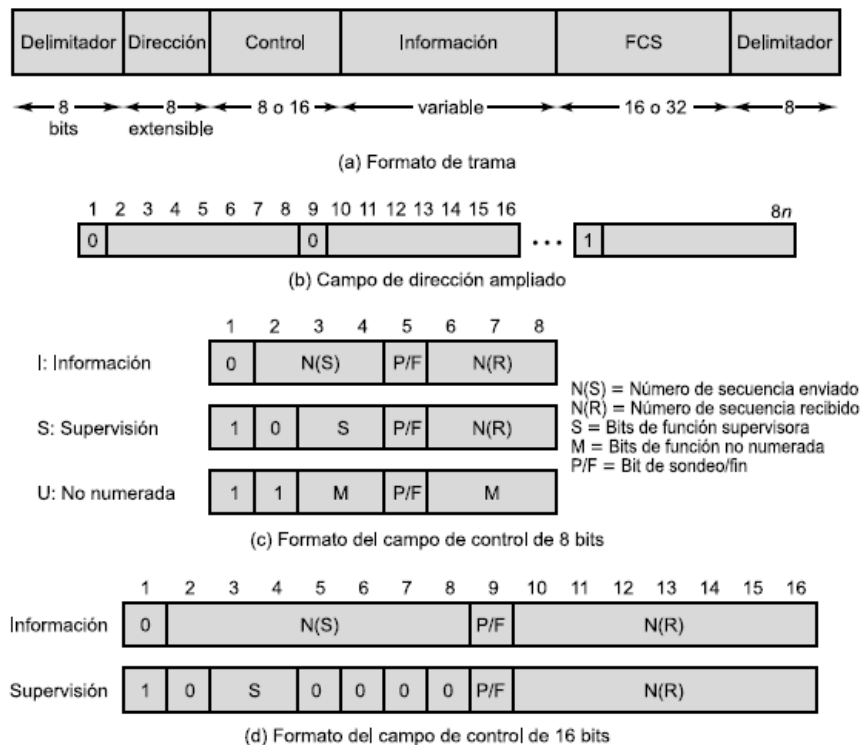


Figura 7.5.3.1: Formato de trama HDLC

Campos de delimitación

Los campos de delimitación están localizados en los dos extremos de la trama y ambos corresponden al patrón de bits 01111110. Se puede usar un único delimitador como final de trama y comienzo de la siguiente simultáneamente. A ambos lados de la interfaz usuario-red, los receptores estarán continuamente intentando detectar la secuencia de delimitación para sincronizarse con el comienzo de la trama. Mientras se está recibiendo una trama, la estación sigue intentando detectar esa misma secuencia para determinar el final de la trama. Debido a que el protocolo permite cualquier combinación de bits (es decir, no se impone restricción alguna en el contenido de los campos), no hay garantía de que la combinación 01111110 no aparezca en algún lugar dentro de la trama, destruyendo de este modo la sincronización de las mismas. Para evitar este problema, se utiliza un procedimiento denominado inserción de bits. En la transmisión de los bits existentes entre los delimitadores de comienzo y de fin, el emisor insertará un 0 extra siempre que se encuentre con la aparición de cinco 1 consecutivos. El receptor, tras la detección del delimitador de comienzo, monitorizará la cadena de bits recibida de tal manera que cuando aparezca una combinación de cinco 1 seguidos, el sexto bit se analiza cómo sigue. Si dicho bit es 0, se eliminará sin más. Si el sexto bit es un 1 y el séptimo es un 0, la combinación se considera como un delimitador.

Campo de dirección

El campo de dirección identifica la estación secundaria que ha transmitido o va a recibir la trama. Este campo no se necesita en enlaces punto a punto, aunque se incluye siempre por cuestiones de uniformidad. El campo de dirección consta normalmente de 8 bits, si bien, tras una negociación previa, se puede utilizar un formato ampliado en el que la dirección es múltiplo de siete bits. El bit menos significativo de cada octeto será 1 o 0 en función de si es o no, respectivamente, el último octeto del campo de dirección. Los siete bits restantes de cada octeto constituyen la dirección propiamente dicha. Un octeto de la forma 11111111 se interpreta como una dirección que representa a todas las estaciones, tanto en el formato básico como en el ampliado. Este tipo de direccionamiento se utiliza cuando la estación primaria quiere enviar una trama a todas las secundarias.

Campo de control

En HDLC se definen tres tipos de tramas, cada una de ellas con un formato diferente para el campo de control. Las tramas de información (tramas-I) transportan los datos generados por el usuario (esto es, por la lógica situada en la capa superior, usuaria de HDLC). Además, en las tramas de información se incluye información para el control ARQ de errores y de flujo. Las tramas de supervisión (tramas-S) proporcionan el mecanismo ARQ cuando no se usa la incorporación de las confirmaciones en las tramas de información (piggybacking). Las tramas no numeradas (tramas-U, del inglés Unnumbered) proporcionan funciones complementarias para controlar el enlace.

El primero o los dos primeros bits del campo de control se utilizan para identificar el tipo de trama. Los bits restantes se organizan en subcampos como se indica en las Figuras 7.5.3.1 (c) y (d).

Todos los formatos posibles del campo de control contienen el bit sondeo/fin (P/F, poll/final), cuya utilización es dependiente del contexto. Normalmente, en las tramas de órdenes se denomina bit P y se fija a valor 1 para solicitar (sondear) una trama de respuesta a la entidad HDLC par. En las tramas de respuesta, este bit se denomina F y se fija a valor 1 para identificar la trama de respuesta devuelta tras la recepción de una orden.

Obsérvese que el campo de control básico en las tramas-S y en las tramas-I utiliza números de secuencia de 3 bits. Mediante una orden que fije el modo adecuado, en estas tramas se puede hacer uso de un campo de control ampliado en el que los números de secuencia sean de 7 bits. Las tramas-U tienen siempre un campo de control de 8 bits.

Campo de información

El campo de información sólo está presente en las tramas-I y en algunas tramas-U. Este campo puede contener cualquier secuencia de bits, con la única restricción de que el número de bits sea igual a un múltiplo entero de octetos. La longitud del campo de información es variable y siempre será menor que un valor máximo predefinido.

Funcionamiento

El funcionamiento de HDLC consiste en el intercambio de tramas-I, tramas-S y tramas-U entre dos estaciones. Estos tres tipos de tramas se explicarán a través de la descripción del funcionamiento de HDLC.

El funcionamiento de HDLC implica tres fases. En primer lugar, uno de los dos extremos inicia el enlace de datos, de manera que las tramas se puedan intercambiar de una forma ordenada. Durante esta fase se acuerdan las opciones que se usarán en el intercambio posterior. Tras la iniciación, los dos extremos intercambian datos de usuario e información de control para llevar a cabo los procedimientos de control de flujo y de errores. Finalmente, uno de los dos extremos indicará la finalización de la transmisión.

Inicio

El inicio lo puede solicitar cualquiera de los dos extremos en base a la transmisión de una de las seis órdenes previstas para fijar el modo. Esta orden tiene tres objetivos:

1. Avisa al otro extremo sobre la solicitud de la iniciación.
2. Especifica cuál de los tres modos (NRM, ABM, ARM) se está solicitando.
3. Indica si se van a utilizar números de secuencia de 3 o de 7 bits.

Si el otro extremo acepta la solicitud, la entidad HDLC transmitirá una trama de confirmación no numerada (UA, Unnumbered Acknowledgment) al extremo iniciante. Si la solicitud se rechaza, se envía una trama de modo desconectado (DM, Disconnected Mode).

Transferencia de datos

Cuando la iniciación haya sido solicitada y aceptada, se habrá establecido una conexión lógica. A partir de entonces, ambos extremos pueden comenzar a enviar datos mediante el uso de tramas-I, empezando por el número de secuencia 0. Los campos N(S) y N(R) de una trama-I contendrán los números de secuencia con los que se lleva a cabo el control de flujo y de errores. La entidad HDLC numerará la secuencia de tramas-I de forma ordenada módulo 8 o módulo 128, dependiendo de si se utilizan, respectivamente, 3 o 7 bits; para ello se usará el campo N(S). El campo N(R) se utiliza para llevar a cabo la confirmación de las tramas-I recibidas; de esta forma, se facilita que la entidad HDLC indique al otro extremo el siguiente número de trama-I que espera recibir. Las tramas-S también se usan para controlar el flujo y los errores. La trama RR (receptor preparado) confirma la última trama-I recibida mediante la indicación de la siguiente trama-I que se espera recibir. La trama RR se usa cuando no hay tráfico (tramas-I) en sentido contrario en el que se puedan incluir las confirmaciones. La trama RNR (receptor no preparado) confirma una trama-I, como lo hace la RR, pero a la vez solicita a la entidad situada al otro extremo del enlace que suspenda la transmisión de tramas-I; cuando la entidad que envió la trama RNR esté de nuevo preparada, enviará una RR. La trama REJ (rechazo) sirve para iniciar el procedimiento ARQ con vuelta atrás N. A través de ella se indica que la última trama-I recibida se ha rechazado y, en consecuencia, se solicita la retransmisión de todas las tramas-I con números de secuencia posteriores a N(R). La trama SREJ (rechazo selectivo) se usa para solicitar la retransmisión de una única trama.

Desconexión

Cualquiera de las dos entidades HDLC pares puede iniciar la desconexión, tanto por iniciativa propia (si es que ha habido algún tipo de fallo) como tras la petición cursada por capas superiores. HDLC lleva a cabo la desconexión mediante el envío de una trama DISC (desconexión, DISConnect). La entidad remota puede aceptar dicha desconexión mediante la devolución de una trama UA, e informando a su capa 3 sobre la finalización de la conexión. Cualquier trama-I pendiente de confirmación puede perderse, en cuyo caso será responsabilidad de las capas superiores su recuperación.

Ejemplos de funcionamiento

Para comprender mejor el funcionamiento de HDLC, en la Figura 7.5.3.2 se presentan varios ejemplos. En los diagramas utilizados, cada flecha incluye un texto que especifica el nombre de la trama, el valor del bit P/F y, donde sea oportuno, los valores de los campos N(R) y N(S). El bit P/F se considera a valor 1 si aparece explícitamente; en caso contrario, se supondrá a valor 0.

En la Figura 7.5.3.2 (a) se muestran las tramas involucradas en el establecimiento y desconexión del enlace. Una de las entidades HDLC envía una orden SABM a la otra e inicia un temporizador. La entidad par, tras recibir la trama SABM, devuelve una respuesta UA e inicializa las variables locales y los contadores correspondientes. La entidad que inició el enlace recibe la respuesta UA, inicia sus variables y contadores y detiene el temporizador. La conexión lógica ya está establecida, por lo que ambos extremos pueden comenzar a enviar tramas. Si el temporizador anterior

expirara sin obtener la respuesta esperada, el extremo correspondiente repetirá la transmisión de la trama SABM como se indica en la figura. Este procedimiento se debe repetir hasta que se reciba una trama UA, una trama DM o hasta que, tras un cierto número de intentos, la entidad que esté intentando establecer la conexión desista e informe acerca del fallo a una entidad de gestión. En tal caso, se necesitará la intervención de las capas superiores. En la misma figura (véase Figura 7.5.3.2 (a)) se muestra el procedimiento de desconexión. Uno de los dos extremos envía una orden DISC y el otro responde con una trama UA.

En la Figura 7.5.3.2 (b) se muestra el intercambio full-duplex de tramas-I. Cuando una de las entidades envía una serie de tramas-I consecutivas sin que se reciban tramas de datos, el número de secuencia recibido $N(R)$ se repetirá en todas ellas (por ejemplo, I,1,1; I,2,1 en el sentido de A a B). Cuando una entidad recibe una serie de tramas-I contiguas sin que se envíe ninguna trama, el valor del número de secuencia recibido de la siguiente trama que se emita reflejará toda esta actividad acumulada (por ejemplo, I,1,3 en el sentido de B hacia A). Obsérvese que, además de las tramas-I, el intercambio de datos puede implicar la utilización de tramas de supervisión.

En la Figura 7.5.3.2 (c) se muestra el funcionamiento para el caso en que el receptor esté ocupado. Tal situación se presentará cuando la entidad HDLC no sea capaz de procesar las tramas-I a la velocidad a la que se reciben, o cuando el usuario no sea capaz de aceptar datos tan rápidamente. En ambos casos, la memoria temporal de la entidad receptora se desbordará, por lo que se debe detener de algún modo la recepción de tramas-I; para ello se utiliza una orden RNR. En el ejemplo, A envía una trama RNR, con la que solicita a B que detenga la transmisión de tramas-I. La estación que recibe la trama RNR sondeará, por lo general, a la estación ocupada mediante el envío periódico de tramas RR con el bit P puesto a 1. Esto exige que el otro extremo responda con una trama RR o con una RNR. Cuando la situación de ocupado cese, A devolverá una trama RR, con lo que la transmisión de tramas-I desde B se podrá reanudar.

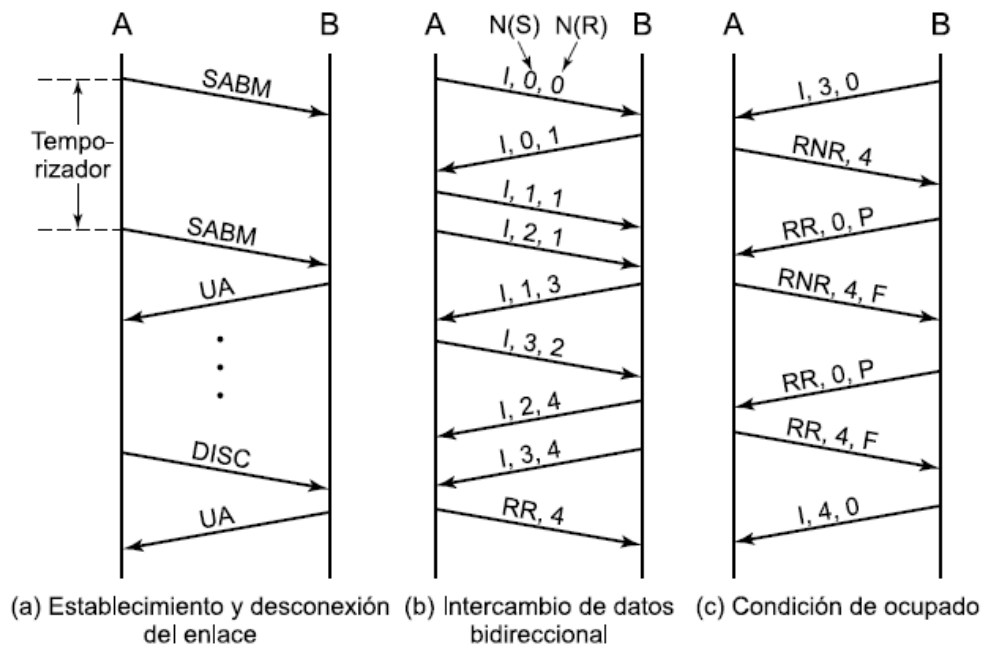


Figura 7.5.3.2: Funcionamiento de HDLC

