

Redes de computadoras

Un conjunto de computadoras conectadas para compartir información u otros recursos es una **red** de computadoras. En cualquier red se distinguen por lo menos tres elementos de hardware:

- Las computadoras conectadas se llaman **hosts** o nodos terminales.
- Los **enlaces** que conectan las computadoras. Los enlaces suelen llamarse **punto a punto** cuando conectan únicamente dos nodos, o **compartidos** cuando al mismo enlace se conectan más de dos nodos.
- Otros **nodos intermedios**, los **routers**, que sirven para encaminar el tráfico de información entre los nodos terminales.

Para utilizar la red, todos los nodos que están conectados a ella, ya sean terminales o intermedios, corren software de red como **protocolos** y **aplicaciones de red**. Los protocolos son, por un lado, convenciones que establecen con todo detalle cómo se realiza una comunicación, y por otro lado, los componentes de software que implementan esa forma de comunicación.

Las aplicaciones de red son aplicaciones **distribuidas**, es decir, se componen de al menos dos partes, preparadas para comunicarse unas con otras, y esas partes funcionan en nodos terminales de la red diferentes. Cada aplicación de red utiliza un protocolo, porque la interacción entre las partes debe estar perfectamente determinada para que los nodos se entiendan sin errores ni ambigüedades. Un protocolo puede ser utilizado por varias aplicaciones.

Hoy, la mayoría de las redes están interconectadas por una única red global llamada **Internet**. Para conectarse a Internet, todos los nodos, terminales e intermedios, ejecutan un protocolo básico llamado **IP (Internet Protocol)**, y se puede decir que, desde el punto de vista del software, constituyen una sola red.

Sin embargo, desde el punto de vista de la administración, dentro de Internet existen numerosas redes. Cada red es propiedad de una persona u organización que tiene el control sobre los nodos y enlaces de esa red, decide qué nodos pertenecen o no pertenecen a ella, y qué protocolos y aplicaciones utilizan.

Estas diferentes redes se pueden clasificar por su tamaño.

- Una red cuyos límites (o **diámetro**) son pequeños, se llama una **red de área local o LAN (Local Area Network)**. Típicamente, una LAN está contenida en una oficina, piso o edificio.
- Una red que abarca el área de una ciudad (y por lo tanto, cuyos enlaces utilizan espacios públicos) suele llamarse **red metropolitana o MAN (Metropolitan Area Network)**.
- Una red mayor, que cubre distancias entre ciudades, países o continentes, se llama una **red de área extensa o WAN (Wide Area Network)**. Las redes de los **proveedores de servicios de Internet (ISPs)** suelen clasificarse como WANs.

Modelo de Internet

Las redes pueden estudiarse y comprenderse mediante modelos jerárquicos compuestos por capas, donde cada pieza de hardware o de software pertenece a una capa o nivel.

Cada capa corresponde a un conjunto de problemas relacionados, y a las soluciones posibles. Para funcionar, cada capa se apoya en las soluciones provistas por la capa inmediatamente inferior.

- Aplicación
En la capa de Aplicación se encuentran los protocolos sobre los cuales se basan directamente las aplicaciones distribuidas.
- Transporte
La capa de Transporte soluciona el problema de la entrega de datos entre **procesos** de nodos diferentes.
- Red
La capa de Red soluciona el problema de la entrega de datos entre **nodos** de diferentes redes.
- Enlace
La capa de Enlace soluciona el problema de la entrega de datos entre **nodos de la misma red**.
- Física
La capa Física define la forma como se codifican y transmiten las señales que representan la información.

Switches

En las redes de área local, o LAN, encontramos enlaces compartidos. El cableado de una oficina, un aula o un edificio es un único medio de comunicación compartido por todos los nodos de la red. El cableado se concentra en un punto de conmutación llamado **switch** o, justamente, conmutador, que distribuye el tráfico entre los nodos conectados. Un switch tiene muchas **interfaces** donde se conectan cables punto a punto hacia los nodos de la LAN.

Es posible conectar switches entre sí para mejor distribución del tráfico, formando una **topología** de estrella o de árbol. Todo el conjunto de switches y enlaces de la LAN constituye un enlace compartido, ya que todos los nodos de la LAN pueden comunicarse a través de él.

Los switches y los nodos de las redes de área local ejecutan un protocolo de enlace definido por la norma **IEEE 802.3**. Este protocolo deriva de uno anterior, llamado

Ethernet. Aunque el diseño original de Ethernet era diferente del de 802.3, y el hardware sobre el que funcionaba Ethernet era muy diferente del de los switches actuales, este nombre de Ethernet sigue usándose informalmente para las redes construidas con switches 802.3.

Un switch 802.3 conduce unas unidades de tráfico básicas, los **frames o tramas** 802.3, entre los nodos de la red de área local, conectados al enlace compartido formado por todos los switches y cableado de la LAN. La misión de este protocolo de enlace termina donde termina la red de área local. Los frames o tramas jamás salen fuera de la LAN. Por eso decimos que la función de **nivel de enlace** de una red es entregar el tráfico **entre nodos adyacentes**. Es decir, los que se encuentran sobre el mismo enlace.

Routers

Suele definirse a Internet como “red de redes”. Las grandes redes, y en particular Internet, se componen interconectando redes a través de enlaces, a veces de gran longitud. Entre cada dos de estas redes siempre existe un **router**.

El router presta el servicio que no alcanza a prestar el nivel de enlace, que es el de enviar el tráfico fuera de la red de origen. El nivel al que pertenecen los routers se llama **nivel de red**.

Los routers son los elementos que toman las decisiones de **enrutamiento** o ruteo, al determinar por cuál de sus interfaces, que a veces son muchas, debe ser enviada la información que reciben. Esta tarea de enrutar la información se cumple mediante software de enrutamiento.

El hardware y el sistema operativo de los routers pueden estar altamente especializados en la tarea de ruteo, pero también es perfectamente posible construir un router a partir de una computadora corriente de escritorio y un sistema operativo multipropósito. Es decir que los routers no son sino computadoras, con un sistema operativo y un hardware similares a los que encontramos en muchas otras computadoras, pero dedicadas a la tarea del enrutamiento.

Dependiendo del ambiente donde deben trabajar y de la cantidad de tráfico que deben procesar, los routers pueden adoptar muchas formas físicas y tamaños.

- Los routers pueden ser pequeños y baratos, para uso doméstico.
- Algunos pueden dar servicio a muchos nodos terminales al incluir múltiples dispositivos de nivel de enlace, como un switch 802.3 de varias interfaces, y un **punto de acceso** para una **red inalámbrica** secundaria basada en tecnología de radio.
- Algunos, de muy altas prestaciones, usados por los proveedores de servicios de Internet, son **modulares** y pueden ser configurados a medida de las necesidades. Cada módulo contiene **interfaces** especializadas en alguna tecnología de enlace, lo que les permite conectar redes de tecnologías completamente diferentes.

Interfaces

La interfaz es el punto de conexión entre un enlace y un nodo de la red. Es la pieza de hardware que convierte bits a señales capaces de viajar por la red, y viceversa. Cuando un nodo debe comunicar algo a otro, prepara su mensaje en una zona de la memoria, y entrega esos contenidos binarios a la interfaz a través de un bus de comunicación.

La interfaz contiene el hardware necesario para traducir ese **tren de bits** a señales eléctricas (cuando los enlaces son cableados), de radio (cuando el enlace es inalámbrico), o luminosas (cuando el enlace es de fibra óptica).

Las modernas interfaces de red pueden funcionar a **velocidades de transmisión** de muchos bits por segundo. Una LAN cableada actual funciona comúnmente en velocidades de 1 a 10 Gb/s o Gbps (gigabits por segundo). Una LAN inalámbrica suele funcionar a una velocidad de transmisión mucho menor (y, además, variable, dependiendo de condiciones físicas ambientales que tienden a limitar la velocidad de transmisión).

El tren de bits viaja en forma de señales físicas por el enlace hasta llegar a la interfaz del nodo destino dentro de la red de área local. La interfaz receptora decodifica las señales, recuperando los bits originales y comunicándolos al software que espera los datos. Ambas partes de la aplicación distribuida se han comunicado un mensaje.

Medios y enlaces

El material que atraviesan las señales transmitidas sobre un enlace se llama el **medio** del enlace. Las tecnologías de construcción de los enlaces son muchas.

- Cuando las señales se codifican mediante impulsos eléctricos, como en las redes de cables de **par trenzado** o **coaxial**, el medio es un conductor, como el cobre.
- Para distancias mayores (como las transoceánicas) o para ambientes donde existe mucho **ruido** o interferencia electromagnética (como en fábricas), se utiliza **fibra óptica**.
- Cuando no es posible, o práctico, tender un cable, no queda más solución que utilizar emisiones de **radio**. Ejemplos de tecnologías de radio son los enlaces satelitales, los de microondas, y las LAN inalámbricas bajo norma **802.11** conocidas popularmente como **WiFi**. Estas tecnologías utilizan como medio el **espacio**.

Las principales compañías de conectividad del mundo tienden enlaces de fibra óptica transoceánicos. Como la instalación de estos cables es una maniobra muy compleja y tiene un costo altísimo, se aseguran de instalar capacidad de transmisión en abundancia. Por ejemplo, uno de estos enlaces tiene una capacidad de 3.2 Tbps, lo que permitiría transmitir el contenido completo de un disco rígido de 1 TB en

menos de tres segundos. Esta capacidad es compartida entre varios proveedores de Internet que compran el servicio de transporte.

Interesante

Submarine Cable Map

En el pasado también se usaron los enlaces satelitales para resolver el problema de cubrir grandes distancias. Los satélites son repetidores de radio colocados en órbita. Reciben emisiones de una estación terrena y la comunican a otra distante, superando el problema de la curvatura terrestre, que no permitiría la propagación en línea recta de la emisión de radio.

Su principal inconveniente es la alta **latencia o retardo** en la llegada de la señal desde un punto a otro, debido a las grandes distancias que se deben enlazar. Los satélites **geoestacionarios** o de órbita alta (**GEO**) se instalan a una altura de alrededor de 35700 km. Al ubicarlos a esta altura se alcanza un equilibrio entre la fuerza de gravedad terrestre y la fuerza centrífuga del satélite, lo que garantiza que permanecerán inmóviles respecto de algún punto de la superficie terrestre, y así cubrirán siempre la misma región del planeta. Pero la órbita alta implica una gran distancia a recorrer para las señales, lo que introduce demoras de alrededor de un cuarto de segundo entre estaciones terrestres. Estas demoras son tolerables para algunas aplicaciones de tráfico de datos, pero perjudiciales para las comunicaciones interactivas.

Paulatinamente van siendo abandonados en favor de la fibra óptica para comunicación de datos a grandes distancias. Hoy se estima que sólo un 5 % del tráfico internacional es satelital, y el resto es conducido por fibras ópticas. Sin embargo, siguen siendo una buena solución para atravesar áreas continentales, o para distribuir tráfico hacia muchos puntos simultáneos de bajada, como en los medios de comunicación televisivos (aplicación llamada **broadcasting**).

Velocidades de transmisión y de propagación

Cada interfaz funciona a una determinada **velocidad de transmisión**, que es la cantidad de bits por segundo que es capaz de escribir en el enlace, o leer del enlace. Las unidades utilizadas para expresar la velocidad de transmisión son las del sistema decimal. Así, una medida habitual es el Gbps o gigabit por segundo ($10^9 b/s$). La velocidad de transmisión suele ser llamada también **ancho de banda digital**.

Por otro lado, una vez que **cada bit** ha sido escrito en un enlace, ese bit aún debe viajar desde la interfaz de salida hasta la interfaz del otro extremo del enlace. Ese viaje, aunque se realiza a velocidades cercanas a la de la luz, **no es instantáneo**. Dependiendo del medio, la **velocidad de propagación** de un bit puede ser de alrededor de un 60 % a 90 % de la velocidad de la luz, que es de unos 300.000 km/s, o $3 \times 10^8 m/s$.

- Notemos que la **velocidad de transmisión** depende exclusivamente de las características tecnológicas de la interfaz. Son la construcción y la configuración de la interfaz las que definen la velocidad de transmisión a la cual funcionará un enlace, y no el medio con el que se implementa el enlace.
- Por el contrario, notemos también que la **velocidad de propagación** es una cuestión puramente física y **no depende de la tecnología de las interfaces**.

La velocidad de **transmisión** puede mejorarse si se mejoran las tecnologías de interfaz en los extremos del enlace. Pero un medio tiene una determinada velocidad de **propagación**, y ningún cambio en la tecnología de las interfaces cambiará esa velocidad.

Tiempo de transferencia de un mensaje

Conocer las velocidades de transmisión y de propagación nos permite definir un modelo para el **tiempo de transferencia** de un mensaje a través de un enlace.

Este modelo dependerá de otras dos variables: por un lado, como es lógico, del **tamaño** del mensaje que se quiere transmitir; y por otro lado, de la **distancia** que separa las interfaces.

Supongamos que:

- La velocidad de transmisión de la interfaz es V_{transm} .
- La velocidad de propagación del medio es V_{prop} .
- El mensaje es de L bits.
- La distancia entre interfaces, o longitud del enlace, es D .

Entonces:

- El **tiempo de transmisión** para los L bits será $T_{transm} = L/V_{transm}$.
- El **tiempo de propagación** para el enlace de D m será $T_{prop} = D/V_{prop}$.

Notemos una vez más que el **tiempo de transmisión es dependiente de la velocidad de transmisión de las interfaces**, y no de la longitud del enlace. Y además, que el **tiempo de propagación es función de la longitud del enlace**, y no de la velocidad de transmisión de las interfaces.

El **tiempo de transferencia** que demorarán en llegar los L bits a destino, será la suma de ambos tiempos:

$$T_{tot} = T_{transm} + T_{prop}$$

Es habitual ver en la bibliografía de Redes los diagramas de flujo de mensajes, que muestran qué ocurre en cada nodo a medida que transcurre el tiempo. En estos diagramas, el tiempo avanza hacia abajo, y los nodos emisor y receptor están representados por columnas.

En el emisor, a la izquierda, un trazo vertical de línea gruesa encima del nodo indica el tiempo de transmisión de un mensaje. Donde comienza el trazo, comienza la transmisión del primer bit del mensaje. Donde finaliza el trazo vertical y comienza una línea oblicua, finaliza la transmisión del último bit. Mientras más largo este trazo vertical, mayor el tiempo de transmisión y, por lo tanto, menor la velocidad de transmisión de la interfaz.

La línea oblicua, proyectada sobre la columna del emisor, indica el tiempo invertido en atravesar el enlace desde el emisor hasta el receptor. El ángulo formado por la oblicua con la vertical se relaciona con el tiempo de propagación. Mientras más tienda la oblicua a la horizontal, menor será el tiempo de propagación, lo que indica un enlace de menor longitud.

Comparemos ambos tiempos de transmisión y propagación. Podemos tener un **enlace 1** (línea azul) de baja velocidad de transmisión respecto del **enlace 2** (línea verde). Como las líneas de propagación tienen el mismo ángulo, inferimos que los enlaces son de la misma longitud.

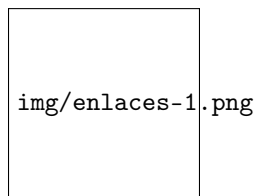


Figura 1: Comparando enlaces de la misma longitud

En este diagrama, el tiempo total mayor corresponde al enlace 1, que es el que tiene el mayor tiempo de transmisión.

Sin embargo, el tiempo de transmisión no es lo único que determina un mayor tiempo de transferencia. Si los enlaces fueran de diferente longitud, la situación podría invertirse. Un enlace de mayor velocidad de transmisión (línea azul) podría seguir siendo el de mayor tiempo de transferencia si fuera de longitud suficientemente mayor que el otro.

Entidades de red

Llamamos **entidades** a las piezas de software o de hardware que funcionan como componentes de los nodos dentro de una red. Las entidades pueden ubicarse a cualquier nivel: pueden ser dos routers, dos interfaces de red, o las partes de una aplicación distribuida.

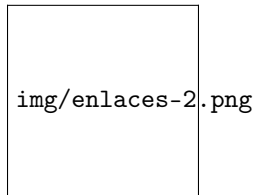


Figura 2: Comparando enlaces de longitudes diferentes

Las entidades de nodos diferentes que van a comunicarse estarán siempre al mismo nivel.

Eventos de red

Llamamos **eventos** a cualquier suceso de interés que ocurre dentro de la red, especialmente si se trata de una interacción entre entidades. Por ejemplo, la llegada de un mensaje.

Protocolos

Los **protocolos** son conjuntos de reglas que definen la interacción entre dos entidades de la red.

Para comunicarse, las entidades de cualquier nivel deben compartir un protocolo. Los protocolos especifican:

- Cuál es el **formato** de los mensajes que pueden intercambiar las entidades;
- Qué tipo de **acciones** o respuestas debe dar cada entidad al recibir cada mensaje.

Puede ser útil comparar los protocolos de red con protocolos sencillos de la vida cotidiana. Muchas interacciones entre las personas están gobernadas por protocolos, a veces poco evidentes. Por ejemplo, comprar un artículo cualquiera en un comercio sigue unas pautas bastante definidas.

Aunque los contenidos específicos de los mensajes pueden variar, es habitual que existan fases en la interacción entre las personas, como el **inicio de sesión, la autenticación, la autorización, las peticiones o requerimientos (*requests*), las respuestas (*responses*), y el cierre de sesión.**

Todas éstas son fases habituales en la comunicación entre los humanos, pero también en los protocolos de las redes.

Modelo cliente-servidor

Estas fases habituales aparecen en los protocolos que definen relaciones de **cliente** y **servidor** entre entidades. En el modelo cliente-servidor:

- El nodo cliente es el que inicia una interacción, con un **request** o requerimiento hacia el servidor.
- El nodo servidor contesta con una respuesta o **response**.
- El ciclo puede repetirse indefinidamente.

La mayoría de las aplicaciones de Internet siguen este **modelo cliente-servidor** de interacción. El protocolo **HTTP**, motor de la **WWW**, es un ejemplo claro.

Modelo peer-to-peer

El modelo cliente-servidor es asimétrico: los roles de cliente y de servidor están bien diferenciados. Un modelo alternativo, diferente, es el llamado **peer-to-peer**, donde no existe un nodo servidor propiamente dicho, sino que todos los nodos que comparten el protocolo son, a la vez, clientes y servidores, en igualdad de condiciones.

Autómatas

Los **autómatas** son una herramienta formal muy útil para describir detalladamente los protocolos. Un autómata es la especificación de los **estados** en los que puede encontrarse una entidad y los **eventos** que disparan los cambios de estado o **transiciones**. El autómata puede tomar la forma de un diagrama de burbujas y flechas.

- En un diagrama de autómata, las burbujas representan **estados**.
- Las flechas representan **transiciones**.
- Las flechas llevan **rótulos** que describen qué **evento** es necesario para disparar la transición, y qué **acción** debe ejecutar la entidad como respuesta al evento.
 - Cuando no se requiere un evento para entrar en un estado (por ejemplo, porque es el estado inicial del autómata), el evento es **vacío** (y se denota "-").
 - Un mensaje de respuesta que confirma la recepción correcta de un mensaje anterior se llama un **reconocimiento o acknowledgement (ACK)**. Si el mensaje de respuesta indica la **recepción incorrecta**, se llama un **acknowledgement negativo o NAK**.

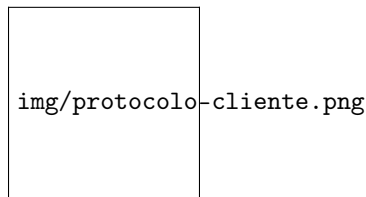


Figura 3: Autómata del cliente

Autómata del cliente

En el ejemplo, el cliente ingresa al estado de **Abriendo conexión** presentando sus credenciales. Si son aceptadas, envía su primera solicitud y pasa al estado **En servicio**. A cada respuesta que reciba, podrá enviar una nueva solicitud. Finalmente, emitirá un mensaje de cierre de conexión y terminará la interacción con el servidor.

Autómata del servidor

Por su parte, el servidor presenta un autómata complementario al del cliente. La mayor parte del tiempo, el servidor estará en el estado **Esperando conexión** hasta que reciba unas credenciales de un cliente. Si las reconoce, pasa al estado **En servicio** donde acepta solicitudes y emite respuestas. Cuando el cliente decide poner fin a la interacción, vuelve al estado de esperar conexión de un nuevo cliente.

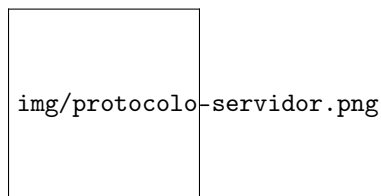


Figura 4: Autómata del servidor

Protocolos de parada y espera

¿Cómo se relacionan, por un lado, las medidas de tiempo de transmisión y tiempo de propagación, y, por el otro, los autómatas de un protocolo cliente-servidor?

Muchos protocolos requieren que una entidad reciba la confirmación de un mensaje anterior antes de poder enviar el siguiente mensaje. Cuando esto ocurre, decimos que el protocolo es del tipo de **parada y espera (stop and wait)**. Cuando el enlace entre dos entidades es de longitud muy grande, un protocolo de parada y espera puede tener una eficiencia muy reducida.

Si la aplicación que desea usar este protocolo de parada y espera es interactiva, y el enlace es muy largo, la experiencia de usuario será frustrante. El usuario deberá soportar las demoras correspondientes al tiempo de propagación de cada mensaje más el de su confirmación. Durante ese lapso, no se puede seguir transmitiendo datos porque aún no ha llegado la confirmación o **ACK** del mensaje anterior. Las demoras pueden hacer que la aplicación directamente no sea viable.

El punto crucial aquí es que este problema **no se resuelve aumentando el ancho de banda de los enlaces**, porque, como hemos dicho, el retardo de propagación no tiene nada que ver con la velocidad de transmisión de las interfaces.

Gran parte de la complejidad de Internet se debe a la necesidad de resolver este problema de los protocolos de parada y espera. En Internet, la solución está representada por el protocolo **TCP/IP**, que en lugar de obligar a esperar un tiempo de propagación por cada mensaje, es capaz de encadenar varios mensajes sin necesidad de esperar confirmación por cada uno. El protocolo TCP pertenece al nivel de **transporte** de las redes.

Pregunta

Supongamos que se tiene un enlace de radio de 1Gbps entre una estación terrestre y un vehículo experimental **que circula por la superficie de Marte**. Supongamos además que la aplicación sea controlar interactivamente desde la Tierra este vehículo mediante un protocolo de parada y espera. Los mensajes de este protocolo son comandos de la forma **avanzar, detenerse, izquierda, derecha**, etc.

La distancia teórica mínima al planeta Marte es de unos $54 \times 10^6 km$. Esto se traduce en unos 3 minutos de retardo de propagación. Quiere decir que cada comando enviado desde la Tierra a Marte demorará, en el mejor caso, unos 6 minutos en ser confirmado. Esto ocasiona problemas para controlar el vehículo, porque una mala maniobra puede dejarlo en una situación peligrosa sobre el escarpado suelo marciano. Se necesita una velocidad de respuesta mucho mayor.

Elevar el ancho de banda digital del enlace, de 1Gbps a 10Gbps, ¿sería una solución?

Direcciones de red

Para poder dirigir los mensajes entre nodos, es necesario identificarlos de alguna forma, asignándoles **direcciones** o identificadores de red.

En Internet, las direcciones son asignadas a las interfaces, y no a los nodos. De esta manera, si un nodo tiene más de una interfaz, recibirá más de una dirección. El caso típico de un nodo con más de una interfaz son los routers, que tienen una interfaz perteneciente a cada una de las redes que conectan.

El protocolo IPv4 define las direcciones de red como números de 32 bits que se asignan a cada interfaz de los nodos. Estas direcciones de 32 bits suelen escribirse como cuatro valores decimales, entre 0 y 255, separados por puntos.

Ejemplo

- La dirección IPv4 **11000000101010000000000100000001** se puede escribir en notación decimal con punto como **192.168.1.1**.

Paquetes IP

Internet es una red del tipo de **conmutación por paquetes**, lo que significa que los flujos de datos que van de un nodo emisor a un receptor son fraccionados en **paquetes** o trozos de datos, de un cierto tamaño máximo, y que los nodos intermedios tratan a cada paquete individualmente para encaminarlos a su destino.

En una red conmutada por paquetes, los nodos intermedios, o routers, no necesitan conocer todo el camino que debe atravesar cada uno de los paquetes. En cambio, un router sólo necesita saber a cuál de los **nodos intermedios adyacentes** encaminarlo, basándose en información transportada por el mismo paquete.

Cada nodo intermedio o router en el camino entre el emisor y el receptor tomará una nueva decisión de ruteo ante cada uno de los paquetes que llegan a él.

Al generar un paquete, para que pueda ser encaminado, el emisor completa los datos con un **encabezado** conteniendo la dirección IP del nodo emisor, o **dirección origen**, y la dirección IP del nodo destino, o **dirección destino**.

Ruteo o encaminamiento

Cuando un paquete llega a un router, lo hace por algún enlace. La tarea del router es **reenviar** este paquete por otro de sus enlaces, de modo que se aproxime a su destino.

El router debe aplicar alguna regla lógica para decidir hacia qué otro enlace **reenviar** el paquete. Esta decisión de cuál será ese otro enlace es una acción de **ruteo** o **encaminamiento**.

Tabla de reenvío o de ruteo

La decisión de ruteo es tomada por los routers usando la información de **destino** que llevan consigo los paquetes, más información de ruteo contenida en una **tabla de reenvío** o tabla de ruteo, almacenada en la memoria del router.

La tabla de ruteo contiene reglas para la decisión de encaminamiento de los paquetes. Cada regla se llama una **ruta** e indica cuál será la interfaz de salida de los paquetes cuya dirección destino coincida con la dirección destino de la ruta.

En líneas generales, el algoritmo de ruteo es como sigue:

- Al recibir un paquete, el router examinará la dirección destino **del paquete** y la comparará con la dirección destino **de cada ruta**.

- Al encontrar una coincidencia de dirección destino entre el paquete y la ruta, utilizará la información en la columna de **interfaz de salida** de esa ruta, reenviando el paquete por esa interfaz.

Sin embargo, ésta es una simplificación. La verdadera forma de la tabla de ruteo es algo diferente. ¿Por qué?

Subredes

Notemos que, ya que las direcciones IP se escriben usando 32 bits, existen más de **cuatro mil millones** de direcciones IPv4 posibles. Una tabla de ruteo completa, con una ruta por cada dirección destino, tal como la hemos descrito, tendría enormes requerimientos de memoria, y el equipamiento de ruteo sería muy costoso.

Las tablas de ruteo verdaderas, entonces, no contienen una ruta por cada dirección destino, sino que las rutas corresponden a conjuntos o agrupaciones de direcciones, llamadas **subredes**.

Un paquete cuya dirección destino pertenezca a una subred utilizará la ruta de dicha subred. Cualquier otra dirección destino que pertenezca a la misma subred recibirá la misma decisión de ruteo.

Si las subredes son agrupaciones suficientemente grandes, la cantidad de reglas de ruteo o rutas disminuirá convenientemente.

Prefijo de subred

¿Cómo agrupar estas direcciones para definir las subredes?

*Todas las direcciones con el mismo **prefijo** de una cierta longitud formarán una subred.*

Ejemplo

- Las direcciones IP 130.240.10.17 y 130.240.11.15 pertenecen a una subred con prefijo común 130.240 de 16 bits. Todas las direcciones pertenecientes a esta subred se escriben como 130.240.XXX.XXX.
- Sin embargo, notemos que, si escribimos las direcciones IP anteriores en su forma binaria, encontraremos que en realidad existe un prefijo común aún más largo. En efecto,

130.240.10.17 = **10000010.11110000.00001010.00010001**

130.240.11.15 = **10000010.11110000.00001011.00001111**

Los primeros **23 bits** de ambas direcciones son iguales, luego comparten un prefijo común de longitud 23. Para escribirlo en notación decimal, adoptemos la convención de completar con ceros la parte no común:

130.240.10.0 = 10000010.11110000.00001010.00000000

Esta convención no es otra cosa que lo que llamamos la dirección de la subred.

Dirección de subred y máscara de subred

Cuando en una tabla de ruteo se especifique una ruta para todas las direcciones con un mismo prefijo, la dirección destino de la ruta será una **dirección de subred**.

Una dirección de subred se calcula utilizando una **máscara de subred**, que es una sucesión de 32 dígitos binarios. Los primeros n dígitos de la máscara son **unos**, y los restantes **ceros**.

La cantidad de dígitos “uno” dice cuál es la longitud del prefijo compartido. Estos primeros n dígitos “unos” definen cuál será el prefijo compartido por todas las direcciones IP que pertenecen a la subred.

Ejemplo

- Una máscara de **24 bits** de longitud puede expresarse como **11111111 11111111 11111111 00000000**, que en la misma notación decimal de las direcciones IP suele escribirse **255.255.255.0**.
- Una máscara de **26 bits** de longitud puede expresarse como **11111111 11111111 11111111 11000000**, o **255.255.255.192**.

Cálculo de la dirección de subred

Para calcular la dirección de subred a la cual pertenece una dirección IP, superponemos la dirección y su máscara de modo de encolumnar todos los dígitos y efectuamos una operación AND bit a bit. El operador AND es el que devuelve 1 solamente si ambos operandos son 1, y en otro caso devuelve 0.

El efecto de este AND es **copiar** en las primeras n columnas del resultado los bits tal cual figuran en la dirección IP, y **completar con ceros** hasta el final del resultado. Este resultado es la dirección de subred a la cual pertenece la dirección IP original.

Ejemplo

- ¿Cuál es la dirección de subred de la dirección IP **170.210.80.129** con máscara 255.255.255.0?

Aplicando la máscara de 24 bits de longitud, la operación AND devuelve la dirección de subred **170.210.80.0**.

- ¿Cuál es la dirección de subred de la dirección IP **170.210.80.129** con máscara 255.255.255.128?

Si escribimos esta máscara en forma binaria, vemos que contiene **25 unos**. La operación AND que copia los primeros 25 bits de la dirección IP y deja los restantes en 0 da la dirección de subred **170.210.80.128**.

Notación alternativa

Una máscara de subred con n bits suele expresarse también como “/ n ”. Así, la dirección IP **192.168.1.1 con máscara 255.255.255.0** puede escribirse más sencillamente como **192.168.1.1/24**.

Con los conceptos de direcciones de subred y máscaras, ya podemos rediseñar la tabla de ruteo. Habrá que especificar **direcciones de subred** en lugar de direcciones de hosts, y para cada ruta en la tabla, agregar cuál es la **máscara** que define el prefijo de la ruta.

Nota

Para simplificar los ejemplos siguientes, utilizaremos direcciones y máscaras de cinco bits. Sin embargo, el mecanismo para el algoritmo de reenvío será básicamente el mismo que con las direcciones reales IPv4 de 32 bits.

Ejemplo

Dirección de subred	Máscara	Interfaz de salida
00000	11100	0
00100	11100	1
00010	11110	2

Esta tabla de ruteo dice que:

- La subred 00000 con máscara 11100 se alcanza mediante la interfaz de salida 0. Es decir, que si los primeros tres bits de la dirección destino de un paquete son 000, el paquete debe ser reenviado por la interfaz 0.
- La subred 00100 con máscara 11100 se alcanza mediante la interfaz de salida 1. Es decir, que si los primeros tres bits de la dirección destino de un paquete son 001, el paquete debe ser reenviado por la interfaz 1.
- La subred 00010 con máscara 11110 se alcanza mediante la interfaz de salida 2. Es decir, que si los primeros **cuatro** bits de la dirección destino de un paquete son 0001, el paquete debe ser reenviado por la interfaz 2.

Preguntas

- En el ejemplo anterior, ¿puede darse un caso donde quepa la duda de si aplicar la primera o la segunda regla?
- ¿Puede darse un caso donde quepa la duda de si aplicar la primera o la tercera regla?

Ruta por defecto o ruta *default*

Aun con la estrategia de ruteo por prefijos, los routers no pueden conocer **todas** las rutas a todos los destinos. Siempre se apoyan en que alguno de sus routers vecinos que esté más próximo al destino tenga más información que ellos.

Cuando un router no sabe cómo encaminar un paquete, lo envía por una interfaz predefinida, en la esperanza de que un router situado sobre ese enlace, que reciba el paquete, tenga mejor información. A este router se lo llama **router por defecto** o **gateway default**, y la ruta que le corresponde es la **ruta por defecto** o **default route**.

Para definir una ruta por defecto agregamos una regla a la tabla de ruteo con **dirección de subred = 00000** y **máscara de red = 00000**. Como la máscara tiene **cero unos**, cualquier dirección IP destino da una coincidencia. Por eso, la regla por defecto se consulta en último lugar, y como último recurso. De lo contrario, la interfaz de la ruta por defecto absorbería todo el tráfico y nunca se reenviaría tráfico a otros enlaces.

En Internet, tiene sentido que la interfaz de la ruta default en cada router sea la que “mira” al centro de la Internet, en la dirección donde hay más nodos. Allí es más probable que existan routers con una configuración mejor.

Rutas más específicas y máscaras más largas

El caso de la ruta default nos permite ver que la ruta más genérica, la menos específica, es la que tiene la máscara más corta. Representa a cualquier subred, o al conjunto de todas las subredes.

Lo inverso también es cierto: si una máscara es más larga, la ruta es más específica. Una máscara más larga representa una subred de **menor** tamaño.

Una máscara larga puede servir para indicar una excepción a una regla más general. Por eso, las máscaras más largas **tienen preferencia** en el proceso de ruteo de un paquete.

Cada vez que un router se encuentre con más de una ruta posible, elegirá aquella cuya máscara de subred sea más larga (es decir, **la ruta más específica**).

Ejemplo

Dirección de subred	Máscara	Interfaz de salida
00000	11100	0
00100	11100	1
00010	11110	2

La primera regla indica que todo destino con sus primeros tres bits iguales a cero se alcanza mediante la interfaz 0. Sin embargo, hay excepciones. Los destinos que cumplan lo anterior pero tengan su **cuarto bit** igual a 1 deben alcanzarse mediante la interfaz 2. La tercera regla es una excepción a la primera porque trata un conjunto más específico de direcciones.

Algoritmo de reenvío

Finalmente podemos presentar el algoritmo de reenvío tal cual lo ejecutan los routers de Internet.

- Para cada regla en la tabla de ruteo, en orden descendente por longitud de prefijo
 - Subred destino del paquete = Dirección destino del paquete AND Máscara de la ruta
 - Si subred destino del paquete = subred de la ruta, reenviar el paquete por la interfaz de salida de esa ruta
- Si se agotó la tabla pero hay una ruta default
 - Reenviar el paquete por la ruta default
- Si se agotó la tabla sin éxito
 - Devolver error de red inalcanzable

Como las reglas se consultan en orden de prefijos más largos a prefijos más cortos, las rutas más específicas se encuentran primero, y tienen preferencia sobre las menos específicas.

Ejemplo

Volvamos a la tabla de ruteo de un ejemplo anterior, sólo que agregándole una ruta default por la interfaz 2:

Regla	Dirección de subred	Máscara	Interfaz de salida
1	00000	11100	0
2	00100	11100	1
3	00010	11110	2
4	00000	00000	2

¿Qué camino tomarán los paquetes con la siguiente dirección destino?

- 00001 → Interfaz 0, por la regla 1
- 00011 → Interfaz 2, por la regla 2, ya que, a pesar de que la dirección destino coincide también con la regla 1, la regla 2 es más específica.
- 01001 → Interfaz 2, por la regla default, ya que las anteriores no han resultado en coincidencias.

Servicio de Nombres de Dominio (DNS)

Como hemos visto, el funcionamiento de Internet se basa en la existencia de **direcciones**, que permiten enviar y encaminar el tráfico entre los diferentes puntos de la red. Sin embargo, las direcciones IP de 32 bits, o su equivalente de cuatro decimales con puntos, son incómodas de manejar para los humanos. El **servicio de nombres de dominio**, o Domain Name Service (**DNS**) es un servicio agregado a la Internet para comodidad de los usuarios.

El servicio DNS permite a los usuarios referirse a los nodos de Internet mediante nombres simbólicos en lugar de direcciones, y entra en acción cada vez que se menciona el **nombre** de un nodo para hacer contacto con él. Un nodo que necesita enviar un mensaje cualquiera a otro nodo necesita conocer su dirección IP. Si únicamente conoce su nombre, pedirá una **traducción de nombre** a algún **servidor DNS**.

Técnicamente, Internet podría funcionar perfectamente (y, de hecho, lo hizo durante algún tiempo) **sin** la existencia del servicio DNS, pero la costumbre lo ha convertido en una parte indispensable de la red.

Jerarquía de nombres de dominio

Estos nombres simbólicos tienen una cierta estructura jerárquica, es decir, organizada por niveles. Un nombre consta de varias partes, separadas por puntos. En cada nombre, las partes más a la derecha designan conjuntos mayores de nodos, y las partes más a la izquierda, conjuntos más pequeños, contenidos en aquellos conjuntos mayores.

Ejemplo

- El nombre **pedco.uncoma.edu.ar** designa al nodo **pedco**, que pertenece al conjunto **uncoma**, contenido en el conjunto **edu** contenido en el conjunto **ar**.
- El nombre **pedco.uncoma.edu.ar** equivale, gracias al servicio DNS, a la **dirección IP 170.210.81.41**.

Estos conjuntos de nombres se llaman **dominios**. Los dominios que aparecen más a la derecha son los más generales. Inicialmente fueron siete de propósito general (**org**, **mil**, **gov**, **edu**, **com**, **net**, **int**), más los pertenecientes a los países (**ar** para Argentina, **cl** para Chile, **uy** para Uruguay. . .), pero luego se agregaron otros. Por

ser los más generales, están al tope de la jerarquía, y se llaman dominios de nivel superior o **TLD (Top-Level Domains)**.

Los dominios de nivel superior contienen otros espacios de nombres, llamados a su vez dominios, y éstos, otros llamados subdominios. En el ejemplo anterior, el TLD es **ar**, el dominio es **edu.ar** (educación, Argentina), el subdominio es **uncoma.edu.ar** (Universidad del Comahue, educación, Argentina) y finalmente **pedco.uncoma.edu.ar** es el nombre de un nodo perteneciente a la Universidad del Comahue, educación, Argentina.

Resolución de nombres

Los servidores DNS se clasifican por el tipo de función que cumplen. Cada uno interviene de una manera especial en el mecanismo de traducción de nombres a direcciones. Este mecanismo de traducción se llama **resolución** de nombres.

- Cada nodo de Internet lleva una configuración que le dice cuál es la dirección de su **servidor DNS local**. El servidor local es quien responde efectivamente una consulta DNS. Normalmente, el servidor local se encuentra “cerca” del cliente en términos de redes. Posiblemente, en la misma red local, o en la del proveedor de acceso a Internet.
- Al ser consultado por un nombre, un servidor local usará la estrategia de analizar ese nombre **de derecha a izquierda**. Utilizará los componentes del nombre en ese orden, es decir, yendo de lo general a lo particular. En primer lugar utilizará el TLD o nombre de nivel superior para averiguar información sobre ese conjunto de nombres.

Los servidores locales no conocen todas las posibles traducciones de nombre a dirección IP, por lo cual necesitan el servicio de los **servidores raíz**. Estos son alrededor de una veintena de servidores distribuidos en diferentes lugares del planeta, y todos tienen la misma información, replicada: las direcciones de los servidores de los TLD.

Así, un servidor local obtendrá, de un servidor raíz, el dato de dónde ubicar al servidor del TLD **ar**.

- Conociendo la dirección IP del servidor del TLD, el servidor local lo interrogará entonces acerca del siguiente componente del nombre.

Los servidores de los TLD tampoco conocen todas las posibles traducciones, sino que conocen las direcciones de los servidores DNS de los dominios por debajo de ellos. Así, el servidor del TLD **ar** puede decirle al servidor local dónde ubicar al servidor del dominio **edu.ar**.

Otra información que este servidor del dominio TLD **ar** podría darle al servidor local, si la pidiera, serían las direcciones de los servidores de los dominios **com.ar**, **org.ar**, etc.

- Ahora el servidor local puede consultar al servidor del dominio **edu.ar**, que es quien puede informarle la dirección del servidor del subdominio **uncoma.edu.ar**.
- Finalmente, el servidor local consulta al servidor del subdominio **uncoma.edu.ar** por la traducción del nombre de nodo **www.uncoma.edu.ar**. Este servidor tiene en sus tablas la información que dice cuál es la dirección IP asignada a ese nombre. Ahora el servidor local puede devolver esa información al cliente que originalmente hizo la consulta.

Todo este complejo mecanismo debería tener lugar cada vez que un cliente de la red consulta por un nombre. Sin embargo, como este mecanismo es costoso en tiempo y en ancho de banda de las redes, se adopta un esquema de **cache** o reserva de información. Como es muy probable que esa información vuelva a ser solicitada, los pares (nombre, dirección) que han sido resueltos quedan guardados en una memoria temporaria o **cache** del servidor local. De esta manera las próximas consultas podrán responderse sin necesidad de volver a generar tráfico hacia el resto de la Internet.

Administración de redes

Existen herramientas de software que permiten diagnosticar las condiciones en que se realiza el ruteo, o encaminamiento, de los paquetes IP. El administrador de redes las utiliza para investigar el origen de los problemas en la red.

Comando ping

El comando **ping** emite paquetes hacia un nodo destino. Si los paquetes logran atravesar la Internet, el nodo destino emitirá una respuesta. El comando ping muestra los paquetes de respuesta que llegan o se pierden, y el tiempo que demora cada respuesta en llegar.

Cuando los usuarios tienen problemas con alguna aplicación de red, el comando ping es útil como herramienta de diagnóstico porque permite saber si la red es capaz de hacer llegar paquetes de un nodo a otro. Si el diagnóstico de ping es positivo, el administrador de red no se preocupa en comprobar cuestiones asociadas con los niveles inferiores a la capa de red: la comunicación a nivel físico, de enlace y de red entre ambos nodos es operativa. Si existe alguna condición de error, se deberá a problemas relacionados con las aplicaciones, que habrá que investigar.

Comando traceroute

El comando **traceroute** permite investigar cuál es la cadena particular de routers que debe atravesar un paquete para llegar a un destino dado. Además, da información

sobre la demora en atravesar cada enlace, lo que puede dar una idea de si existe una condición de **congestión** en el camino de los paquetes, y en qué lugar de Internet.

Una condición de congestión es aquella que aparece cuando los nodos intentan utilizar un enlace más allá de su capacidad. Si un enlace es capaz de transmitir una cantidad de bits por segundo, y las demandas de los nodos de la red superan esa capacidad, el router comienza a acumular o encolar paquetes hasta que no tiene más espacio en su memoria para almacenarlos. A partir de este momento, si llegan nuevos paquetes, simplemente los descarta. El programa traceroute hace evidentes las pérdidas de paquetes, y dice en cuál de los enlaces ocurren.

El programa traceroute también permite detectar anomalías de ruteo como los lazos o ciclos de ruteo, que se producen cuando los paquetes toman caminos circulares de los cuales no pueden salir.