

Appunti di Fondamenti di Comunicazioni e Internet

Canale 2 · Reti · Prof. Marco Polverini

Capitolo 1: Introduzione a Internet

Autore: Tommaso C.

Appunti tratti dalle lezioni in aula e dal materiale del corso

Argomenti: Sistemi terminali · Periferia, accesso e core · Mezzi trasmissivi
Trasduttori · Inoltro e instradamento · Consegna end-to-end
Protocolli e client-server · Standard (RFC, IETF) · Capacità e tempo di trasferimento
Accesso residenziale: DSL e FTTH · Accesso enterprise e rete domestica · Attenuazione
e banda

Indice

1 Sistemi terminali e Internet	1
2 Periferia, accesso e core	1
2.1 Reti di accesso	1
2.2 Router e rete core	2
3 Collegamento diretto e trasduttori	2
4 Inoltro, instradamento e consegna end-to-end	3
5 Protocolli e paradigma client-server	5
6 Standard: RFC e IETF	6
7 Capacità e tempo di trasferimento	7
8 Accesso residenziale	7
8.1 Dal dial-up alla DSL	8
8.2 Rete di distribuzione telefonica	9
9 Accesso enterprise e rete domestica	10
10 Mezzi trasmissivi: attenuazione e banda	11
11 Esercizi	13
12 Soluzioni	14

1 Sistemi terminali e Internet

Definizione – Sistema terminale (host)

Un **sistema terminale** (*end system*, o **host**) è un dispositivo con cui l'utente scambia messaggi e informazioni con destinazioni remote: PC portatili e fissi (workstation), smartphone, server, smart TV, automobili connesse. Si chiama *host* perché **ospita** le applicazioni usate dagli utenti. I tre nomi sono intercambiabili.

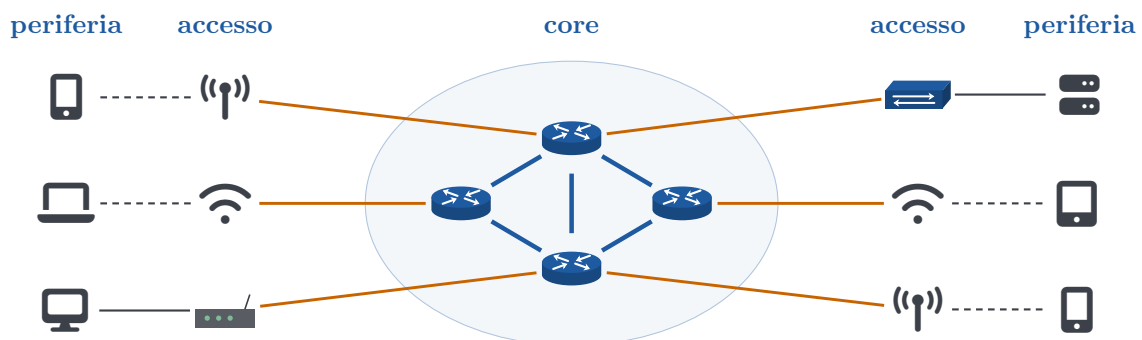
La domanda del corso è come un'informazione generata in un punto sorgente, ovunque si trovi, venga consegnata a un sistema terminale di destinazione, per esempio un'email scritta da casa e letta da un PC dall'altra parte del mondo.

Internet è l'infrastruttura che risponde: tanti dispositivi, apparati e tecnologie diverse che **cooperano** per un unico servizio, la consegna dei messaggi **end-to-end**. In prima approssimazione è ciò che resta togliendo i sistemi terminali.

2 Periferia, accesso e core

Definizione – Struttura di Internet

- **Periferia** (confini della rete): i sistemi terminali, su cui girano le applicazioni.
- **Rete di accesso**: la parte dell'infrastruttura che collega un sistema terminale al resto di Internet, e in particolare al core.
- **Core** (*backbone*, dorsale): il cuore della rete, a cui sono connesse le reti di accesso.



2.1 Reti di accesso

Il **mezzo trasmissivo** è il materiale di cui è fatto un collegamento, su cui si propaga il segnale. Le reti di accesso si classificano per mezzo: il **cavo** (rame o fibra ottica) negli accessi **cablati** (*wired*, con filo), l'**aria**, in cui si propagano onde radio, negli accessi **wireless** (senza filo). I due accessi radio si distinguono per la mobilità che offrono.

Elemento di accesso	Mezzo	Mobilità	Ambito
Stazione radio base	aria	macromobilità	area urbana, <i>outdoor</i>
Access point Wi-Fi	aria	micromobilità	stanza o edificio, <i>indoor</i>
Cavo	rame, fibra	nessuna	postazione fissa

La **stazione radio base** della rete mobile è un'antenna sul tetto di un edificio o in cima a un'altura che dà copertura radio a un'area geografica; l'**access point** Wi-Fi è un'antenna più piccola, con il *gateway* di casa (il “modemino”). Per ambito si distinguono l'accesso **residenziale** (Sezione 8) e l'accesso **enterprise**, con la rete domestica (Sezione 9).

2.2 Router e rete core

Definizione – Router, link e rete core

Un **router** è un apparato di rete interconnesso ad altri router tramite **collegamenti** (*link*, o canali di comunicazione). La **rete core** è un'interconnessione di router attraverso link.

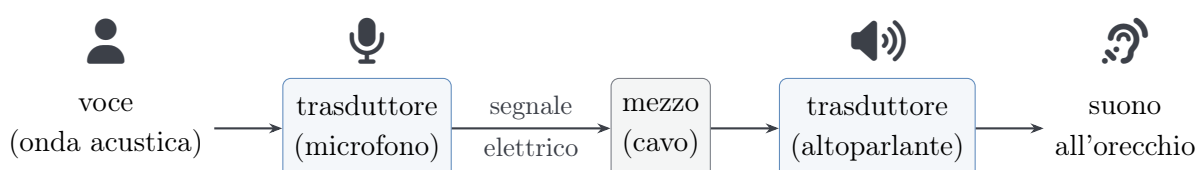
In pratica la rete core è una grande infrastruttura nazionale: cavi che fanno da “autostrade” fra le città, di solito gestiti da un grande operatore (in Italia una delle reti nazionali è di TIM). Utenti di città diverse, serviti da operatori di accesso diversi, si collegano al core, che consegna il traffico da una città all'altra, anche con cavi sottomarini.

3 Collegamento diretto e trasduttori

Definizione – Trasduttore

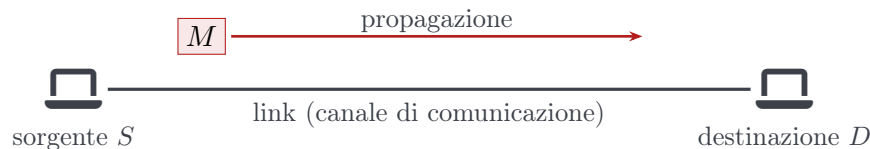
Un **trasduttore** converte il segnale d'ingresso (per esempio la voce) in un segnale adatto a essere trasferito sul mezzo di comunicazione. In ricezione un secondo trasduttore compie la conversione opposta.

Il microfono trasforma la voce, un'onda di pressione (acustica), in un **segnale elettrico**, che si propaga bene lungo un cavo come onda elettromagnetica. Dall'altra parte l'altoparlante lo ritrasforma in un'onda sonora per l'orecchio. In una telefonata i trasduttori sono due: microfono e altoparlante.



Quando sorgente S e destinazione D sono collegate **direttamente** da un link (canale di comunicazione):

1. la sorgente genera un messaggio M e lo mette sul link;
2. il messaggio si propaga lungo il link;
3. la destinazione lo riceve e lo elabora.



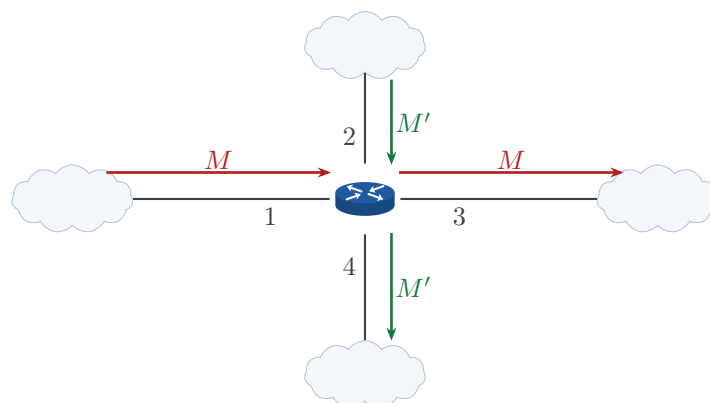
M può essere un'email, un messaggio, una pagina web, una foto: tutto ciò che si scambia su Internet è **immagine, voce o video**. Su un collegamento diretto la comunicazione avviene in modo naturale; il problema nasce quando il collegamento diretto non c'è.

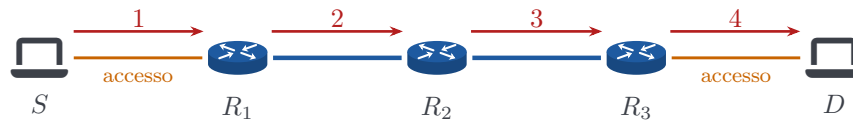
4 Inoltro, instradamento e consegna end-to-end

Definizione – Inoltro e consegna hop by hop

Un router ha più **interfacce** (porte), ciascuna collegata a un link. L'**inoltro** è la funzione con cui il router prende un messaggio ricevuto da un'interfaccia d'ingresso e lo rilancia sull'interfaccia d'uscita da cui si raggiunge la destinazione. Ripetendo l'inoltro router dopo router, il messaggio viene consegnato **salto dopo salto** (*hop by hop*) fino alla destinazione. Il dispositivo successivo lungo il percorso si chiama **next hop**.

Messaggi diversi possono uscire da interfacce diverse: in figura M entra dalla 1 ed esce dalla 3, M' entra dalla 2 ed esce dalla 4, perché le loro destinazioni stanno dietro porte diverse.



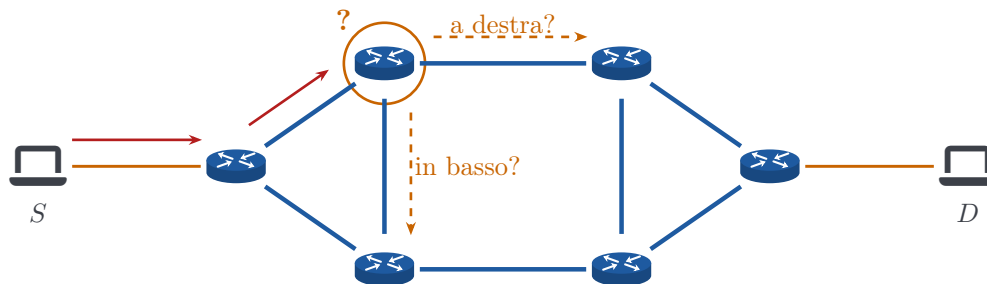


S può scambiare messaggi con R_1 , a cui è collegata direttamente, ma vuole raggiungere D : i router rilanciano il messaggio finché arriva.

Definizione – Instradamento

L'**instradamento** (*routing*) è la funzione con cui si trova il percorso che un messaggio deve seguire da una certa sorgente a una certa destinazione. È una funzione dei router distinta dall'inoltro.

In una catena lineare non c'è niente da decidere; in una rete magliata un router ha più uscite e deve scegliere su quale rilanciare il messaggio.



Proposizione – Consegna di un messaggio end-to-end

1. Tramite una rete di accesso, il sistema terminale consegna il messaggio M a un **router di accesso**.
2. Il router svolge l'**instradamento** e trova il percorso verso la destinazione.
3. Salto dopo salto, i router del percorso **inoltrano** il messaggio fino al destinatario.
4. A ogni salto il messaggio diventa un **segnale elettromagnetico** che si propaga sul collegamento (rame, fibra ottica o radio) e viene ricevuto dal next hop.

5 Protocolli e paradigma client-server

Definizione – Protocollo

Un **protocollo** è una procedura eseguita per raggiungere un obiettivo, cioè per realizzare una funzione. Specifica:

- la **procedura** stessa;
- le **parti**, cioè gli attori che la eseguono;
- i **messaggi** che gli attori si scambiano.

Internet si descrive per i dispositivi che la compongono o per i protocolli che usa e i servizi che eroga: **HTTP** per il web, **FTP** (*File Transfer Protocol*) per i file, i protocolli di posta per le email; altri servizi sono telefonia e videoconferenza.

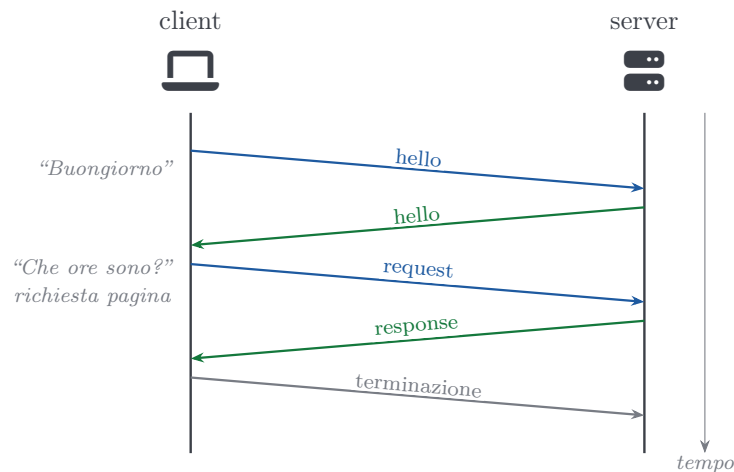
Esempio – Un protocollo umano: chiedere l'ora

Obiettivo: conoscere l'ora. Le parti sono chi chiede (il **cliente**) e chi risponde (il **fornitore**). I messaggi sono un saluto, la richiesta "Che ore sono?" e la risposta con l'informazione.

Definizione – Client e server

Il **client** è l'attore che vuole usufruire di un servizio; il **server** è l'attore che lo fornisce. I protocolli del **paradigma client-server** hanno quasi tutti quattro fasi:

1. **hello**: contatto iniziale;
2. **request**: il client chiede il servizio;
3. **response**: il server risponde;
4. **terminazione**: si chiude lo scambio.



La fase di **hello** serve a:

- controllare che l'altra parte ci sia e ci senta: due macchine, a Roma e a New York, non conoscono lo stato l'una dell'altra;
- controllare che parli la stessa lingua, cioè supporti lo stesso protocollo (HTTP/3 chiesto a chi non lo implementa non funziona);
- negoziare alcuni parametri prima di cominciare.

6 Standard: RFC e IETF

Definizione – Standard, RFC e IETF

Un protocollo **standard** è specificato in modo pubblico e condiviso, così che tutte le macchine del mondo lo implementino **esattamente nello stesso modo**; altrimenti non comunicano.

- Gli **RFC** (*Request For Comments*) sono i documenti che stabiliscono come funzionano i protocolli di Internet: per esempio IP (*Internet Protocol*), TCP, UDP (*User Datagram Protocol*).
- L'**IETF** (*Internet Engineering Task Force*) è l'ente che standardizza i protocolli di Internet e li mantiene aggiornati.

I **protocolli proprietari** non sono aperti: danno valore aggiunto, ma sono diffusi solo fra i dispositivi di un **vendor**, un'azienda che produce apparati di telecomunicazione. Chi ha apparati di un vendor (per esempio Cisco) che parlano un protocollo proprietario, per ampliare l'infrastruttura deve tornare dallo stesso vendor.

7 Capacità e tempo di trasferimento

Definizione – Capacità

La **capacità** C di un collegamento è la velocità con cui vi si inviano i dati. Si misura in **bit al secondo** (bit/s); più è alta, migliore è il collegamento.

Proposizione – Tempo di trasferimento

Il tempo per trasferire un file di dimensione F su un collegamento di capacità C è

$$T = \frac{F}{C}$$

con F in **bit**, non in byte: un file dato in byte si moltiplica prima per 8.

A parità di file, più è alta la capacità, più è breve il trasferimento, sia per scaricare un contenuto dalla rete sia per caricarlo. Un esercizio d'esame su questa formula è l'Esercizio 1.

Definizione – Collegamento dedicato e condiviso

Un collegamento è **dedicato** se vi passano tutti e soli i flussi di traffico originati da un utente o destinati a lui; è **condiviso** se vi passano i flussi di più utenti.

Il traffico di un utente ha due versi: **upstream** dall'utente verso la rete (per esempio il caricamento di un file), **downstream** dalla rete verso l'utente (per esempio un film).

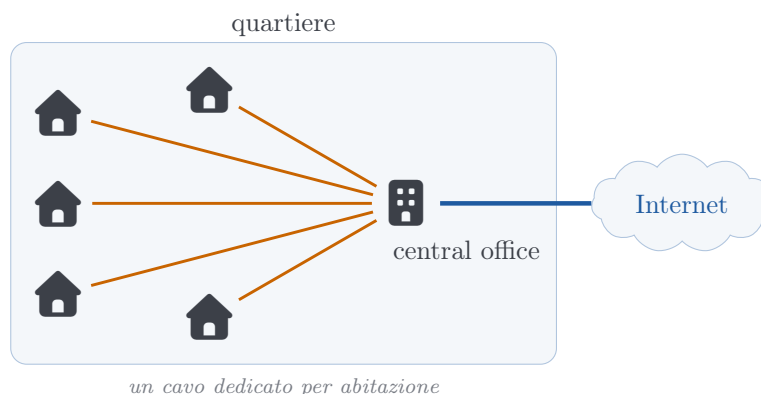
Proposizione – Capacità di un collegamento condiviso

- Su un collegamento **dedicato** l'utente usa tutta la capacità C .
- Su un collegamento **condiviso** la capacità è ripartita fra gli utenti che stanno inviando flussi. Con una ripartizione equa fra n utenti ciascuno avrebbe C/n ; nella realtà la ripartizione non è necessariamente equa.

8 Accesso residenziale

Definizione – Accesso residenziale punto-punto

In un quartiere c'è in genere un edificio, la **centrale** o **central office**, collegato al resto di Internet. Nell'accesso **punto-punto** *ciascuna* abitazione è collegata al central office da un proprio cavo, in fibra ottica o in rame.



In questo schema il cavo fra abitazione e central office è **dedicato**, mentre il collegamento fra il central office e il resto della rete è **condiviso** da tutte le abitazioni del quartiere. La rete telefonica reale divide ancora il primo tratto (Sezione 8.2).

8.1 Dal dial-up alla DSL

L'accesso residenziale è nato sulla **rete telefonica** in rame, già diffusa su tutto il territorio. Con il **dial-up** il modem fa una telefonata al central office e su di essa invia dati digitali, al massimo a 56 kbit/s: troppo poco per un video a buona risoluzione, che richiede da 2 Mbit/s a 4 Mbit/s.

Definizione – DSL

Se il cavo punto-punto fra l'abitazione e il central office è in **rame**, la rete di accesso appartiene alla famiglia **DSL** (*Digital Subscriber Line*), con ADSL e VDSL. La DSL usa in modo più efficiente la stessa infrastruttura telefonica del dial-up e arriva a circa 100 Mbit/s.

Tecnologia	Velocità indicativa
Dial-up	fino a 56 kbit/s
ADSL free	~ da 256 kbit/s a 640 kbit/s
ADSL flat	~ da 2 Mbit/s a 6 Mbit/s
ADSL2+	~ da 10 Mbit/s a 20 Mbit/s
VDSL2	~ da 50 Mbit/s a 100 Mbit/s

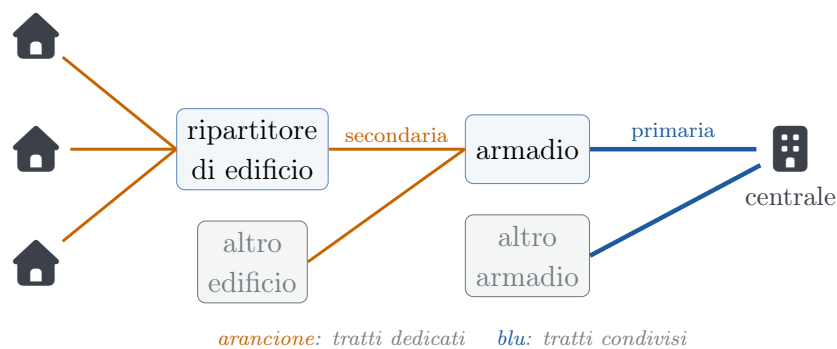
La fibra consente prestazioni maggiori, ma richiede cantieri e forti investimenti per costruire la nuova infrastruttura; per questo negli anni '90 e 2000 l'accesso in rame è stato di gran lunga il più usato. Una tecnologia serve solo se è **diffusa**: nel 2004 l'ADSL copriva già l'80% del territorio nazionale, mentre le sue evoluzioni, che richiedono di rifare in fibra alcuni tratti della rete, sono partite da zero e nel 2012 coprivano il 92% (ADSL2+) e il 27% (VDSL2).

8.2 Rete di distribuzione telefonica

Definizione – Rete primaria e secondaria

Dall'abitazione alla centrale il collegamento telefonico attraversa tre tratti:

1. il filo telefonico dal **ripartitore di edificio**, sulla facciata, alla singola abitazione;
2. la **rete secondaria**, dal ripartitore di edificio all'**armadio** stradale, a cui fanno capo più edifici;
3. la **rete primaria**, dall'armadio alla **centrale** telefonica, a cui fanno capo più armadi.



Proposizione – Dove l'accesso residenziale è condiviso

Il collegamento fra un utente residenziale e il central office non è interamente dedicato:

- fino all'armadio il collegamento è **dedicato** all'utente;
- dall'armadio al central office, nella rete primaria, è **condiviso** fra tutti gli utenti di quell'armadio.

Le tecnologie VDSL e **FTTx** (*Fiber To The X*, fibra fino a un punto X della rete) aumentano la capacità dei tratti condivisi, e quindi la capacità che ogni utente ottiene dalla condivisione.

Definizione – FTTH

Nell'**FTTH** (*Fiber To The Home*) un collegamento in fibra **dedicato** arriva dal central office fino all'abitazione. La capacità per l'utente aumenta per due motivi: il collegamento è tutto suo e la fibra ha proprietà di propagazione molto migliori del rame della DSL.

Oltre a DSL e FTTH, da casa si accede con la rete **mobile** (per esempio il 5G tramite l'hotspot del telefono) o tramite operatori locali in radio, con tecnologie come Wi-Fi o WiMAX. Anche le reti satellitari come Starlink sono reti di **accesso**, non core.

9 Accesso enterprise e rete domestica

Definizione – Accesso enterprise

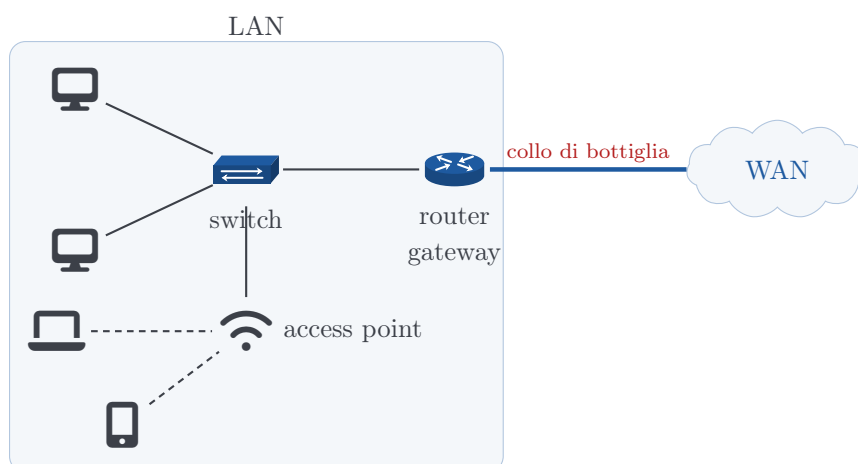
L'**accesso enterprise** è l'infrastruttura privata con cui un'azienda o un'università collega i propri utenti al resto di Internet.

- I dispositivi **fissi** (il PC di un'aula) si collegano con un cavo **Ethernet**.
- Gli altri sono coperti da un accesso **wireless**: serve molti utenti senza un cavo per ciascuno e li lascia muovere.

Definizione – Switch e access point

- Lo **switch** è un dispositivo multiporta che collega fra loro più macchine; come il router, svolge una funzione di commutazione.
- L'**access point** è un'antenna che copre una regione ristretta, per esempio una stanza, e vi fornisce accesso a Internet.

L'access point è di solito collegato allo switch, e lo switch a un router, il **gateway**, che separa la rete locale dalla rete esterna.



Definizione – LAN, WLAN e WAN

- Una **LAN** (*Local Area Network*) è una rete confinata in un'area locale, per esempio un edificio. Una **WLAN** (*Wireless LAN*) è una LAN senza fili, di solito Wi-Fi.
- Una **WAN** (*Wide Area Network*) si estende su un'area molto più grande, fino al territorio nazionale o continentale.

La rete enterprise è condivisa da tutti i suoi utenti, ma è piccola e ha pochi utenti, e quindi raggiunge capacità alte: il Wi-Fi arriva a diverse centinaia di Mbit/s, un cavo Ethernet fino a 10 Gbit/s, tre ordini di grandezza sopra i Mbit/s dell'accesso residenziale.

Definizione – Collo di bottiglia

Il **collo di bottiglia** (*bottleneck*) è il collegamento che limita superiormente la velocità ottenibile in una comunicazione, anche se gli altri tratti hanno capacità maggiore.

Come l'acqua esce da una bottiglia alla velocità permessa dalla strozzatura, la velocità verso una destinazione esterna non supera la capacità del collo di bottiglia, per quanto sia veloce la LAN. Di solito il collo di bottiglia è il collegamento fra il router gateway e la WAN: centinaia di Mbit/s, nei casi migliori 1 Gbit/s, condivisi da tutti gli utenti della LAN.

Definizione – Rete domestica

La **rete domestica** è l'accesso enterprise in scala ridotta. I dispositivi di casa (computer, tablet, smartphone, TV) accedono a Internet tramite un'unica scatola, di solito fornita dall'operatore e chiamata "router", che integra:

- un access point Wi-Fi e uno switch Ethernet;
- il router e le funzioni di sicurezza.

Verso il resto della rete la scatola si collega in rame o in fibra.

10 Mezzi trasmissivi: attenuazione e banda

I mezzi cablati più usati sono il **rame**, di cui è fatto anche il cavo Ethernet, e la **fibra ottica**; li distinguono l'attenuazione e la banda passante.

Definizione – Attenuazione

L'**attenuazione** è il fenomeno per cui l'energia del segnale si riduce mentre si propaga: più lontano è il ricevitore, più debole arriva il segnale. Quanto sia forte dipende dal mezzo trasmissivo.

Per la voce, un'onda acustica, l'energia emessa si distribuisce su una sfera che cresce con la distanza: un orecchio lontano ne raccoglie una porzione più piccola e sente meno, anche se chi parla emette sempre la stessa energia.

Definizione – Banda passante

La **banda passante** di un mezzo trasmissivo è l'intervallo di frequenze dei segnali che vi si possono propagare. Fuori da questo intervallo l'attenuazione è troppo forte e il segnale non si propaga. Si misura in **hertz** (Hz).

Proposizione – Banda e capacità

Più è larga la banda passante di un mezzo, maggiore è la capacità complessiva con cui vi si può trasmettere, e più utenti vi si possono servire.

Le telecomunicazioni usano lo spettro da 3 kHz a 300 GHz, diviso in bande di una decade ciascuna. Nella banda **UHF** (*Ultra High Frequency*), da 300 MHz a 3 GHz, stanno i servizi d'uso quotidiano come la telefonia cellulare 3G, 4G e 5G.

3G, 4G, 5G								
VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	
3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz

Riepilogo

- **Struttura:** host alla periferia, reti di accesso, core di router interconnessi da link.
- **Inoltro e instradamento:** rilancio sull'interfaccia verso la destinazione, hop by hop; scelta del percorso.
- **Protocollo:** procedura, parti, messaggi; standard negli RFC, curati dall'IETF.
- **Capacità:** C in bit/s; $T = F/C$ con F in bit.
- **Dedicato o condiviso:** su un link condiviso C si divide fra i flussi attivi.
- **Accesso residenziale:** dial-up e DSL su rame (fino a 100 Mbit/s); FTTH, fibra dedicata fino a casa.
- **Collo di bottiglia:** il link che limita la velocità, spesso gateway-WAN.
- **Mezzo:** attenuazione e banda passante; più banda, più capacità.

11 Esercizi

Esercizio 1 – Appello del 08/02/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 14, adattato

Si supponga di avere un file di dimensione 40 kByte e di utilizzare una compressione con rapporto di compressione $R = 8$ (il file compresso è 8 volte più piccolo). Se in una linea che ha velocità di V Mbit/s il file viene trasferito in meno di 0,8 ms, qual è la velocità V della linea?

- a. $V = 40$ Mbit/s;
- b. $V = 62,5$ Mbit/s;
- c. $V = 6,25$ Mbit/s;
- d. $V = 50$ Mbit/s.

Soluzione a pagina 14 →

12 Soluzioni

Soluzione dell'Esercizio 1 – Appello del 08/02/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 14, adattato

Dimensione in bit, con 1 kByte = 1000 byte e 1 byte = 8 bit:

$$F = 40 \cdot 1000 \cdot 8 \text{ bit} = 320\,000 \text{ bit}.$$

Il file compresso è 8 volte più piccolo:

$$F_c = \frac{320\,000 \text{ bit}}{8} = 40\,000 \text{ bit}.$$

Dal tempo di trasferimento $T = F_c/V$, il trasferimento dura al più 0,8 ms se

$$V \geq \frac{F_c}{T} = \frac{40\,000 \text{ bit}}{0,0008 \text{ s}} = 5 \times 10^7 \text{ bit/s} = 50 \text{ Mbit/s}.$$

Verifica: $40\,000 \text{ bit}/50 \text{ Mbit/s} = 0,8 \text{ ms}$. Con 40 Mbit/s servirebbe 1 ms; il valore 6,25 Mbit/s si ottiene dimenticando il fattore 8 fra byte e bit. Risposta: d, la velocità minima.

[*← Torna all'Esercizio 1, pagina 13*](#)