



UNIVERSITÀ DI PISA

Dipartimento di Informatica  
Corso di Laurea in Informatica

# Reti di Calcolatori

Giacomo Trapani  
Anno Accademico 2020/2021

## Premessa.

Si danno le seguenti definizioni:

- **Rete:** interconnessione di dispositivi in grado di scambiarsi informazioni, quali sistemi terminali, router, switch e modem.
- **Host (sistema terminale):** sono macchine appartenenti agli utenti finali, dedicate all'esecuzione di applicazioni (e.g. computer, tablet, smartphone) oppure "server" che forniscono servizi a diverse applicazioni utente (e.g. posta elettronica, web).
- **Dispositivi di interconnessione:** si distinguono in "router" (i.e. dispositivi che interconnettono reti) e "switch" (i.e. dispositivi che collegano fra loro molteplici host a livello locale).
- **Collegamenti (link):** mezzi trasmissivi (cablati, wireless).

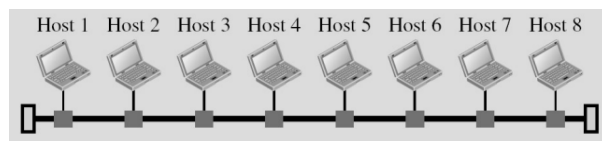
## Tipi di Reti.

### LAN (Local Area Network).

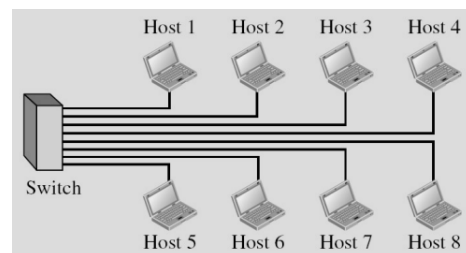
Le LAN vengono definite come reti di computer circoscritte a un'area geograficamente limitata (si estendono al più per alcuni chilometri, sono circoscritte ad aree limitate come un ufficio, una scuola, un edificio etc.). Si cita Ethernet come tecnologia LAN popolare.

Le LAN sono tipicamente di proprietà di una qualche organizzazione (sono dunque reti private), connettono sistemi terminali (stampanti, PC, workstations) mediante cavi di rame o connessioni wireless.

Si distinguono LAN con cavo condiviso (obsoleto) e LAN con switch (moderne); il maggiore vantaggio della seconda sulla prima è che non ha bisogno di far passare un pacchetto da ogni dispositivo connesso nel percorso dal router al (dispositivo) target.



(a) LAN con cavo condiviso.

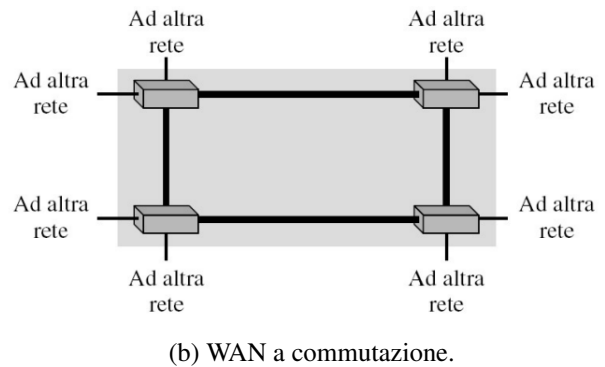
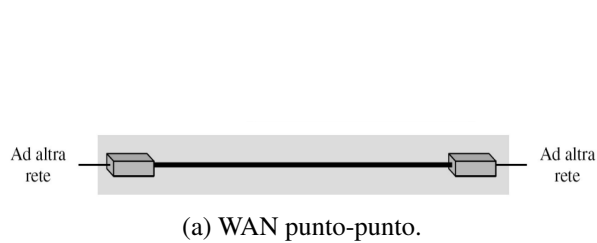


(b) LAN con switch.

### WAN (Wide Area Network).

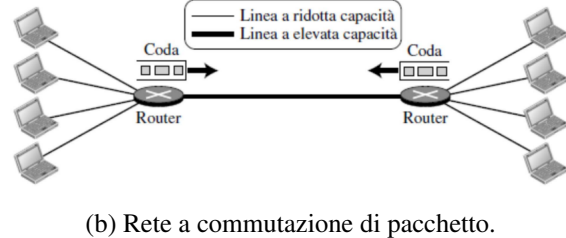
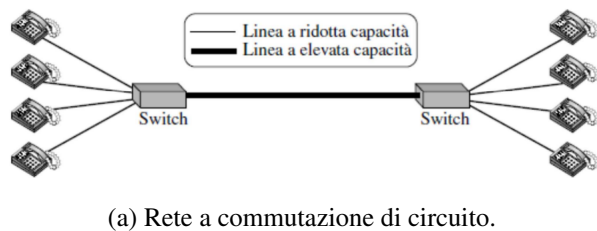
Una WAN (o rete geografica) è una rete il cui compito è di interconnettere LAN o singoli host separati da distanze geografiche. Viene tipicamente gestita da un operatore di rete che fornisce servizi ai clienti. Un esempio di WAN è la rete GARR.

Si distinguono WAN punto-punto (collegano direttamente due dispositivi attraverso un mezzo trasmissivo (e.g. cavo in fibra ottica, ponti radio)) e WAN a commutazione (collegano più di due punti di terminazioni (e.g. dorsali Internet)); le seconde sono dotate di elementi di commutazione (i.e. elaboratori specializzati utilizzati per connettere tra loro più linee di trasmissione).



## Tecniche di commutazione.

Si definiscono “tecniche di commutazione” le modalità con cui viene determinato il percorso sorgente-destinazione e vengono dedicate ad esso le risorse della rete. Si distinguono due tecniche: circuit switching (si parla di “reti a commutazione di circuito”) e packet switching (“reti a commutazione di pacchetto”).



## Circuit switching.

La rete determina un percorso dalla sorgente alla destinazione, su questo viene riservato e garantito un rate di trasmissione costante per la durata dell'intera sessione di comunicazione (una frazione della capacità di trasmissione dei link).

Un esempio di rete a commutazione è la rete telefonica fissa tradizionale.

**Svantaggi:** le risorse rimangono inattive quando non utilizzate e non vengono mai condivise, necessaria una fase di instaurazione della comunicazione (detta anche di “setup”) nella quale si configurano le tabelle di switching, la scarsa flessibilità nell'uso delle risorse può portare a “overprovisioning” e/o a un sottoutilizzo di queste in presenza di rate di traffico variabile.

**Vantaggi:** performance garantita, overhead limitato, tecnologie di switching efficienti.

## Packet switching.

Il flusso di dati punto-punto viene suddiviso in pacchetti che condividono le risorse di rete e instradati singolarmente e indipendentemente dagli altri. Si parla di trasmissione “store and forward”: il commutatore (tipicamente un router) deve aspettare di aver ricevuto per intero il pacchetto prima di poter trasmettere sul collegamento in uscita.

Non c'è un canale dedicato e la sequenza dei pacchetti non segue uno schema prestabilito (si parla di “multiplexing statistico”): i router possono memorizzare i pacchetti nelle code (“buffer”) nel caso in cui il collegamento

sia già usato alla massima capacità, introducendo dunque dei “ritardi di coda” e il rischio di “congestione”; non si ha garanzia nelle prestazioni e si corre il rischio di avere una perdita di pacchetti poiché i buffer hanno dimensione finita.

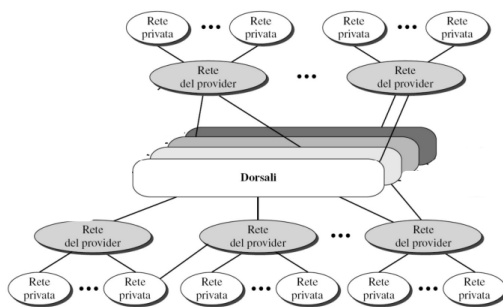
**Svantaggi:** alto overhead, tecnologie di inoltro non efficienti (si ha la necessità di selezionare l’uscita per ogni pacchetto), tempo di elaborazione ai router (si parla di “routing table lookup”), accodamento ai router.

**Vantaggi:** risorse trasmissive usate solo su richiesta, segnalazione non necessaria.

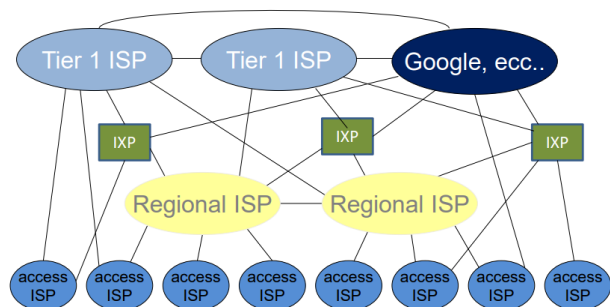
## Internet.

Si definisce “internet” una rete costituita da due o più reti interconnesse; un esempio di internet è Internet, una rete a commutazione di pacchetti composta da migliaia di reti interconnesse che seguono l’Internet Protocol e rispettano convenzioni precise per nomi e indirizzi, che fornisce servizi di comunicazione alle applicazioni e per le applicazioni.

Le reti dei sistemi terminali sono connesse a Internet attraverso una gerarchia di fornitori di servizi internet (Internet Service Provider); definisco “dorsale” una ISP di primo livello. Si permette l’esistenza di “Internet eXchange Point”, definiti come punti di incontro per il peering tra due o più ISP.



(a) Internet: rete di reti - versione semplificata.



(b) Internet: rete di reti - versione moderna.

## Metriche.

Si definiscono i seguenti parametri, utilizzati per misurare le prestazioni della rete:

- **Larghezza di banda (Bandwidth):** larghezza dell’intervallo di frequenze utilizzato dal sistema trasmissivo misurato in Hertz.
- **Velocità di trasmissione (Bitrate o transmission rate):** quantità di dati (bits) che possono essere trasmessi (“inseriti nella linea”) nell’unità di tempo (bits/secondo o bps) su un certo collegamento; dipende alla larghezza di banda e dalla tecnica trasmissiva utilizzata.
- **Throughput:** quantità di dati che possono essere trasmessi da un nodo sorgente a un nodo destinazione in un certo intervallo di tempo al netto di perdite sulla rete, duplicazioni, protocolli etc.
- **Latenza:** tempo richiesto affinché un messaggio arrivi a destinazione dal momento in cui il primo bit parte dalla sorgente; è definito come somma di ritardo di elaborazione, di accodamento, di trasmissione e di propagazione.

Si definiscono dunque i ritardi sopra elencati:

- **Ritardo di elaborazione:** è dovuto al controllo di errori sui bit e alla determinazione del canale di uscita.
- **Ritardo di accodamento:** è il tempo che un pacchetto spende all’interno del buffer (tipicamente di un router), è una quantità aleatoria.
- **Ritardo di trasmissione:** è il tempo impiegato per trasmettere un pacchetto sul link; definendo  $L$  lunghezza del pacchetto in bit,  $R$  rate di trasmissione sul link in bps, vale  $\frac{L}{R}$ .
- **Ritardo di propagazione:** è il tempo che 1bit impiega per essere propagato da un nodo all’altro; definendo  $d$  lunghezza del collegamento fisico,  $s$  velocità di propagazione nel mezzo, vale  $\frac{d}{s}$ .

Si definisce inoltre il “ritardo end-to-end” come sommatoria del ritardo ai singoli nodi:

$$R_{end-to-end} = \sum_{i=1}^N R_{nodo_i}.$$

Si ricorda l'esistenza dei comandi “traceroute”, che traccia un pacchetto dal proprio dispositivo all'host mostrando anche il numero di passaggi (salti) necessari per raggiungerlo assieme al ritardo dal mittente per ogni passaggio, e “ping”, che calcola il ritardo per la trasmissione dal dispositivo corrente all'host.

## Modelli stratificati.

Si definisce un “protocollo” come un insieme di regole che permettono a due entità di comunicare; nei sistemi di comunicazione non è sufficiente un singolo protocollo, si ricorre a una organizzazione di protocolli.

Si definisce inoltre “aperto” un insieme di protocolli i cui dettagli sono disponibili pubblicamente e i cui cambiamenti sono gestiti da una organizzazione la cui partecipazione è aperta al pubblico; definisco “sistema aperto” un sistema che implementa protocolli aperti.

Per la stratificazione si fa riferimento ai principi di “separation of concern” (i.e. separazione degli interessi e delle responsabilità, fare ciò che compete, delegando ad altri tutto ciò che è delegabile) e “information hiding” (i.e. nascondere tutte le informazioni che non sono indispensabili per il committente per definire completamente un'operazione).

In concreto:

- Il modello permette di scomporre il problema in sottoproblemi più semplici il cui sviluppo è indipendente (da quello degli altri sottoproblemi).
- Ogni strato scambia informazioni con quelli adiacenti, ma comunica logicamente con il proprio omologo; fornisce informazioni allo strato superiore e usa i servizi offerti da quello inferiore.
- Un singolo strato svolge una sola funzione e realizza uno e un solo livello logico.

A questo punto l'obiettivo diventa realizzare una rete di calcolatori in cui qualsiasi terminale comunica con un qualsiasi fornitore di servizi mediante qualsiasi rete; lo standard per l'interconnessione di sistemi aperti è il modello ISO/OSI.

## Modello ISO/OSI.

Si danno le seguenti definizioni nei termini del modello ISO/OSI:

- **Livello** (o **strato**): modulo interamente definito attraverso i servizi, protocolli e le interfacce che lo caratterizzano.
- **Servizio**: insieme di primitive (operazioni) che uno strato fornisce ad uno strato soprastante.
- **Interfaccia**: insieme di regole che governano il formato e il significato delle unità di dati (es. messaggi, segmenti o pacchetti) che vengono scambiati tra due strati adiacenti della stessa entità.
- **Protocollo**: insieme di regole che permettono a due entità omologhe (stesso strato) uno scambio efficace ed efficiente delle informazioni, definiscono il formato e l'ordine dei messaggi inviati e ricevuti tra entità omologhe della rete e le azioni che vengono fatte per la trasmissione e ricezione dei messaggi; occorre specificare sintassi e semantica di un messaggio e quali azioni intraprendere una volta ricevuto.

I layer dal livello 5 al 7 sono di supporto all'elaborazione e interazione con l'utente (vengono realizzati a livello software), gli altri 4 alla rete e all'infrastruttura trasmissiva (realizzati a livello hardware e software); tipicamente i nodi intermedi implementano solo i primi 4.

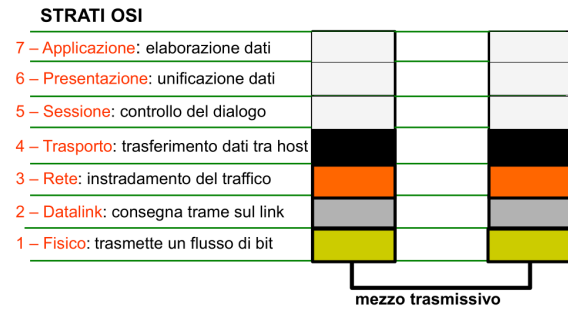
Il modello prevede inoltre l'incapsulamento: il flusso di informazioni - che ha origine al livello applicativo - discende verso i livelli inferiori e viene progressivamente arricchita mediante l'aggiunta di headers.

Si danno in proposito le seguenti definizioni:

- **Header**: qualificazione del pacchetto dati al livello corrente.
- **Data**: payload proveniente dal livello precedente.
- **Trailer**: usato in funzione di trattamento dell'errore.



(a) Pila di protocolli.

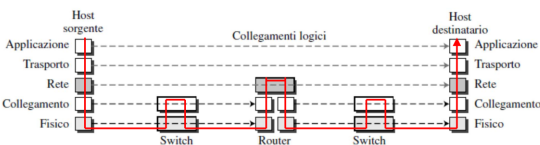


(b) Gerarchia di strati (o "layer").

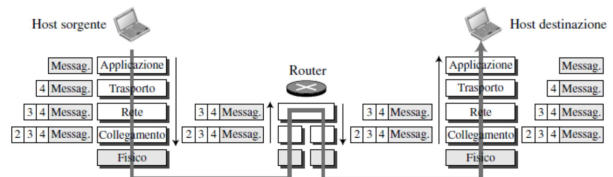
## Stack protocollare TCP/IP.

TCP/IP è una famiglia di protocolli attualmente utilizzata in Internet. Si tratta di una gerarchia di protocolli, ciascuno dei quali fornisce funzionalità specifiche. Prende di riferimento il modello ISO/OSI e si articola nei seguenti 5 livelli (elencati dall'alto al basso):

- **Application Layer:** è di supporto alle applicazioni di rete, permette un collegamento logico end-to-end; si usa per lo scambio di pacchetti di informazioni detti "messaggi". Include i protocolli HTTP, FTP, SMTP...
- **Transport Layer:** permette il trasporto di messaggi tra sistemi terminali; un pacchetto a questo livello prende il nome di "segmento". Include i protocolli TCP (connection oriented, garantisce la consegna dei messaggi) e UDP (connectionless, non garantisce la consegna dei messaggi).
- **Network Layer:** si occupa dell'instradamento di pacchetti detti "datagrammi" dalla sorgente alla destinazione tipicamente attraversando una serie di router. Include i protocolli IP, ICMP.
- **Link Layer:** si occupa di trasferire pacchetti detti "frame" attraverso il collegamento tra elementi di rete vicini. Include i protocolli Ethernet, PPP, WiFi...
- **Physical Layer:** si occupa di trasferire individualmente i bit contenuti nei singoli frame da un nodo al successivo.



(a) Comunicazione in una internet - livello fisico.



(b) Comunicazione in una internet - incapsulamento.

## Application Layer.

Si danno in merito le seguenti definizioni:

- **Application Programming Interface:** insieme di regole che un programmatore deve rispettare per l'utilizzo delle risorse.
- **Socket:** API che funge da interfaccia tra gli application e transport layer; due processi comunicano mandando dati alla socket (che fa da connessione a livello logico) il cui invio e ricezione sono responsabilità dei restanti quattro livelli dello stack TCP/IP nel sistema operativo. È la API di Internet.
- **Uniform Resource Identifier:** stringa di caratteri che identifica una risorsa (i.e. qualsiasi cosa abbia una identità) presente sulla rete. Se ne distinguono di due tipi:
  - **Uniform Resource Locator:** sottoinsieme di URI che identifica le risorse attraverso il loro meccanismo di accesso. Segue la sintassi <scheme>://<user>:<password>@<host>:<port>/<path>: "scheme" identifica il protocollo, "user" e "password" sono opzionali e generalmente deprecati, "host"

è il nome di dominio di un host, “port” è il numero di porta del server, “path” identifica la risorsa nel contesto specificato.

- **Uniform Resource Name:** sottoinsieme di URI che devono rimanere globalmente unici e persistente anche quando la risorsa cessa di esistere e diventa non disponibile.

A questo livello si distinguono due modelli architetturali:

- **Client-Server:** esiste un host sempre attivo (il “server”) che serve le richieste di altri host (i “clients”).
- **Peer-to-Peer:** la comunicazione avviene tra coppie di dispositivi non sempre attivi (i “peer”) che possono offrire servizi e inviare richieste.

Per poter inviare dati risulta necessario poter indirizzare opportunamente il processo destinatario: per Internet si usa la coppia indirizzo IP (i.e. un intero a 32bit che identifica univocamente una macchina host), numero di porta (un intero a 16bit che identifica univocamente un processo all’interno di una macchina).

Il livello di trasporto mette a disposizione due protocolli diversi per la comunicazione:

- **TCP:** ha le seguenti caratteristiche:
  - **Connection-oriented:** è necessaria una fase di setup iniziale tra client e server prima di poter trasmettere messaggi (si parla di “handshaking”).
  - **Controllo del flusso:** il mittente non “inonderà” di dati il destinatario.
  - **Controllo di congestione:** “strangola” il mittente (client o server) quando la rete è sovraccarica.
  - Garantisce il trasporto affidabile tra processo mittente e destinatario.
  - Non offre garanzie di timing né di ampiezza minima di banda.
- **UDP:** ha le seguenti caratteristiche:
  - **Connectionless:** non orientato alle connessioni, non prevede una fase di setup iniziale.
  - Trasporto non affidabile.
  - Non implementa meccanismi di controllo di flusso.
  - Non implementa meccanismi per il controllo di congestione.
  - Non offre garanzie di timing né ampiezza minima di banda.

applicazione	Tolleranza alla		Sensibilità al tempo
	Perdita di dati	throughput	
file transfer	no	elastico	no
e-mail	no	elastico	no
Documenti Web	no	elastico	no
Telefonia su Internet/ videoconferenza	si	audio: 5kbps-1Mbps video: 10kbps-5Mbps	Si, centinaia di msec
audio/video memorizzato	si	come sopra	Si, pochi secondi
Giochi interattivi	si	Pochi kbps	Si, centinaia di msec
Messaggistica istantanea	no	elastico	Si e no

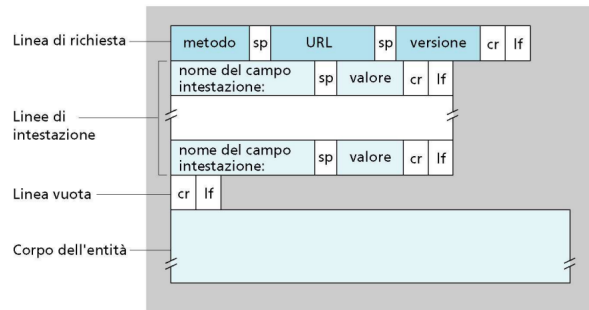
(a) Tipo di trasporto richiesto da applicazioni comuni.

applicazione	protocollo di livello applicazione	Protocollo di trasporto
e-mail	SMTP [RFC 2821]	TCP
remote terminal access	Telnet [RFC 854]	TCP
Web	HTTP [RFC 2616]	TCP
file transfer	FTP [RFC 959]	TCP
streaming multimedia	HTTP (e.g., YouTube), RTP [RFC 1889]	TCP or UDP
Internet telephony	SIP, RTP, proprietary (e.g., Skype)	TCP or UDP

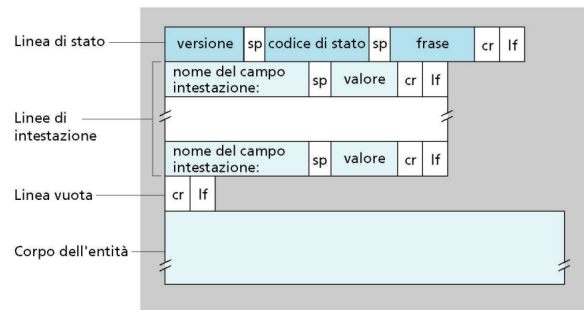
(b) Esempi di applicazioni Internet e i relativi protocolli.

Si passa dunque alla trattazione dei protocolli implementati a questo livello:

- **HTTP:** ha le seguenti caratteristiche:
  - **Stateless:** non ha memoria di stato: le coppie richiesta, risposta sono indipendenti; ogni richiesta viene eseguita indipendentemente da quelle che la han preceduta.
  - **Richiesta/Risposta:** La connessione viene iniziata dal client, che invia un messaggio di richiesta detto “request” a cui il server risponde con un messaggio di risposta detto “response”.
  - Usa TCP.
  - HTTP/1.0 permetteva solo connessioni non persistenti, HTTP/1.1 prevede che - di default - le connessioni siano invece persistenti e vengano mantenute fino a una richiesta di chiusura. I server che rispettano HTTP/1.1 supportano inoltre il pipelining (i.e. consiste nell’invio da parte del client di molteplici richieste senza aspettare la ricezione di ciascuna risposta, il server deve inviare le risposte nello stesso ordine in cui sono state ricevute; riguarda solo metodi idempotenti); implementato in pochi browser, introduce il rischio di Head of Line Blocking (i.e. se una richiesta richiede tempo per essere processata le risposte a quelle successive sono bloccate).



(a) HTTP Request Message.



(b) HTTP Response Message.

I metodi messi a disposizione dal protocollo sono:

- **OPTIONS:**
- **GET:**
- **HEAD:**
- **POST:**
- **PUT:**
- **DELETE:**
- **TRACE:**
- **extension-method:**



## Formato dei messaggi.

Appare evidente che il formato ASCII 7bit non permetta di rappresentare caratteri speciali: si introduce il protocollo **Multipurpose Internet Mail Extension (MIME)**.

Vengono fornite delle regole di codifica e di decodifica per trasformare caratteri speciali e contenuti multimediali in caratteri ASCII 7bit; questo approccio ha permesso di inviare messaggi MIME usando protocolli e mail server esistenti (risulta necessario modificare gli User Agents).

I mail server moderni possono negoziare l'invio di dati in codifica binaria (8 bit); se non ha successo, inviano caratteri ASCII 7bit seguendo il protocollo MIME.

## Protocolli di accessi alla Mail.

SMTP è un protocollo di tipo "push", per la ricezione risulta necessario un protocollo di tipo "pull". Alcuni esempi sono: Post Office Protocol (POP), Internet Mail Access Protocol (IMAP), HTTP (quando User Agent è un browser).

## Strato Applicativo DNS.

Si danno le seguenti definizioni:

**Nome:** identifica un oggetto con una sequenza di caratteri scelti da un alfabeto finito; si usa per motivi mnemonici e per disaccoppiare il livello applicativo da quello di rete.

**Indirizzo:** identifica la locazione dell'oggetto (i dispositivi connessi alla rete vengono individuati mediante indirizzi da 4byte detti "indirizzi IP").

**Dominio:** sottoalbero nello spazio dei nomi di dominio che viene identificato dal nome di dominio del nodo in cima al sottoalbero.

Inizialmente l'associazione tra nomi logici e indirizzi IP era statica (i.e. tutti i nomi logici e i relativi indirizzi IP erano contenuti in un file detto "host file"); questo approccio risulta attualmente impraticabile. Si ricorre al sistema DNS.

## Domain Name System (DNS).

Il DNS si trova al livello applicativo, viene fornito da sistemi terminali e usa servizi del livello di trasporto per trasferire messaggi, non interagisce direttamente con gli utenti a meno che non ci siano errori.

E' un meccanismo che deve specificare la sintassi dei nomi e le regole per gestirli, consentire la conversione da nomi a indirizzi e viceversa. è costituito essenzialmente da:

- uno schema di assegnazione dei nomi gerarchico e basato su domini;
- un database distribuito contenente i nomi e le corrispondenze con gli indirizzi IP implementato con una gerarchia di name server;
- un protocollo per la distribuzione delle informazioni sui nomi tra name server host, router, name server comunicano per risolvere nomi (traduzione nome/indirizzo) utilizzando tipicamente UDP con porta 53.

Offre i seguenti servizi:

- risoluzione di nomi di alto livello (hostname) in indirizzi IP;
- host aliasing (i.e. un host può avere più nomi, vengono tradotti nel nome canonico e - di seguito - nell'indirizzo IP);
- mail server aliasing (i.e. sinonimi per mail server; e.g. nome identico per mail server e web server);
- distribuzione carico (i.e. un hostname canonico può corrispondere a più indirizzi IP, il DNS restituisce la lista variandone l'ordine per ogni risposta).

Per i nomi viene usata una struttura gerarchica (i.e. un nome è costituito da diverse parti (e.g. lab3.di.unipi.it)); in questo modo l'assegnazione dei nomi può essere delegata a singole organizzazioni e la responsabilità di convertire nomi e indirizzi distribuita.

## **Name Server.**

Si definisce come un programma che gestisce la conversione da nome di dominio a indirizzo IP.

Si definiscono inoltre:

**Server Radice:** responsabile dei record della zona radice e restituisce le informazioni sui name server di TLD.

**Server Top-Level Domain:** mantiene le informazioni dei nomi di dominio che appartengono a un certo TLD, restituisce le informazioni sui name server di competenza dei sottodomini.

**Server di Competenza** (Authoritative Name Server): autorità per una certa zona, memorizza nome e indirizzo IP di un insieme di host dei quali può effettuare traduzioni nome/indirizzo; per una certa zona ci possono essere server di competenza primari e secondari: quelli primari mantengono il file di zona, quelli secondari ricevono il file di zona e offrono il servizio di risoluzione.

**Local Name Servers:** non appartengono strettamente alla gerarchia dei server, ogni ISP (università, società, ISP) ha il proprio; a questi vengono inizialmente rivolte le query DNS: operano da proxy e inoltrano la query in una gerarchia di server DNS.

Quando un programma (es. browser) deve trasformare un nome in un indirizzo IP chiama un programma detto resolver, passando il nome come parametro di ingresso. Il resolver interroga il local name server, che cerca il nome nelle sue tabelle e restituisce l'indirizzo al resolver oppure inoltra la query alla gerarchia DNS