



Claudio Bonechi (clavicordo)

TLC BIGNAMI 6A PARTE

30 December 2019

Premessa

L'intento di questo EYBignami è divulgativo: vuole offrire una panoramica sulle telecomunicazioni senza entrare nei dettagli ma presentando una sintesi dei principali concetti e formule usati nella tecnica delle telecomunicazioni. I contenuti sono estratti dal libro on line "Trasmissione dei Segnali e Sistemi di Telecomunicazione" di Alessandro Falaschi, docente presso l'Università La Sapienza di Roma, che ne ha gentilmente autorizzato l'uso, disponibile integralmente per il **download gratuito** su <http://www.teoriadeisegnali.it> e che potrà essere usato per gli approfondimenti. Il prof. Falaschi infatti mette a disposizione il suo libro nel preciso intento di far circolare l'informazione anziché sottrarla al pubblico mettendola in vendita.

Introduzione

Questa 6a parte contiene la descrizione, ancora incompleta, dei sistemi di telecomunicazione, ossia insieme di apparati interconnessi finalizzati a realizzare l'obiettivo della telecomunicazione: trasmissione e ricezione di messaggi multimediali, che abbiamo definito nella 1a parte.

Tratteremo per sommi capi i seguenti argomenti:

- **Ingegneria del traffico delle reti**
- **Reti a commutazione di circuito**
- **Reti a pacchetto, in particolare Internet**

Restano da esaminare nella 7a parte le **Reti a diffusione**, in particolare la tv analogica, radio FM, tv satellitare; mentre la tv digitale e i sistemi radiomobili saranno oggetto di trattazioni successive.

Condivisione dei canali e "traffico" di rete

I **messaggi**, entità astratte, vengono trasportati da **segnali**, entità energetiche dalla forma finalizzata a stabilire con essi un'*associazione biunivoca*. A loro volta i segnali viaggiano attraverso **canali** fisici. In altre parole i segnali rappresentano i messaggi e tutto il **processo di comunicazione** consiste nel passare dai *messaggi* ai *segnali* (sorgente), spostamento dei segnali attraverso uno o più *canali* (trasmissione e ricezione) e passaggio inverso dai segnali di nuovo ai messaggi (destinazione).

In un canale **fisico** possiamo distinguere un aspetto **materiale** (cavi in fibra o in metallo, porzione di spazio vuoto o occupato da materia liquida o gassosa, più raramente solida) e un aspetto **energetico** (potenza trasmissibile). Questo secondo aspetto consente di inserire in un canale materiale più canali "virtuali", ottenuti con un processo di "**multiplazione**". La multiplazione, che si basa sulla manipolazione della **forma dell'energia**, può avere luogo nel **tempo** o nella **frequenza**, o, più di recente, nel **codice**. I canali fisici sono chiamati "le portanti" o "i portanti" nel gergo delle TLC italiane e non sono da confondere con le *portanti modulate*.

Dal punto di vista del **servizio**, i **canali** possono essere di 2 tipi:

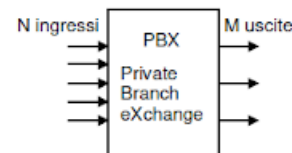
- **dedicato**, quando applicati **solo** tra due utilizzatori in modo temporaneo (ad esempio il tempo di una conversazione telefonica) oppure in modo permanente;
- **condiviso**, quando servono (contemporaneamente o no) più utilizzatori.

Dato che i **canali** sono risorse **economicamente preziose**, si cerca di condividerli il più possibile, approfittando del fatto che spesso il loro utilizzo **non** è **continuo** nel tempo, ma **saltuario**. Tipico è il caso del telefono. La condivisione temporanea viene realizzata attraverso un procedimento detto **commutazione**, che sarà illustrato più oltre.

Nella telefonia fissa (in declino) la condivisione si ferma in prossimità dell'utente, il quale è permanentemente connesso con un doppino telefonico alla centrale o al centralino. Nella telefonia mobile invece anche il canale che giunge all'utente è condiviso.

Per progettare una buona condivisione il criterio più opportuno risulta quello basato sul concetto di **grado di servizio**, a sua volta basato sul concetto di **probabilità** di servizio effettuato a buon fine.

Iniziamo con il chiederci quante linee uscenti M siano necessarie ad un centralino con N interni, in modo che la probabilità di trovare tutte le linee occupate sia inferiore ad un valore massimo, chiamato *grado di servizio*¹. Per trovare il risultato, calcoliamo prima la probabilità che tutte le linee uscenti siano occupate, assumendo noti N ed M .



Affrontiamo il problema in termini ancor più generali, chiedendoci quale sia la probabilità $p_B(k)$ che un numero k di persone (su N) sia contemporaneamente al telefono. Assumiamo che ognuno degli N interni abbia una probabilità p di telefonare, ossia passi il $p \cdot 100\%$ del suo tempo al telefono, e che le telefonate siano statisticamente indipendenti. Allora, ci saranno in media Np telefoni occupati, e la probabilità che un ben preciso gruppo di k individui telefoni (e $N - k$ no), è pari a $p^k q^{N-k}$ (in cui $q = 1 - p$).

Dato che il numero di differenti modi di scegliere k oggetti tra N è pari a $\binom{N}{k} = \frac{N!}{k!(N-k)!} = \frac{N(N-1)\dots(N-k+1)}{k!}$, allora la probabilità di avere k (qualsiasi) persone al

¹Il termine grado di servizio esprime un concetto di *qualità*, ed è usato in contesti diversi per indicare differenti grandezze associate appunto alla qualità dei servizi di telecomunicazione. Nel caso presente, una buona qualità corrisponde a una bassa probabilità di occupato.

telefono è pari a

$$p_B(k) = \binom{N}{k} p^k q^{N-k} \quad (17.1)$$

Risultando che $\sum_{k=0}^N p_B(k) = 1$, la funzione $p_B(k)$ rappresenta una densità di probabilità di v.a. discreta, detta anche variabile aleatoria di *Bernoulli*².

Al variare di k , si ottengono tutte le probabilità cercate, rappresentate nella figura a lato nel caso in cui $p = 0.15$ e $N = 25$, oppure $N = 125$. Nel secondo caso, si utilizza anche il valore $p = 0.07$, che produce una concentrazione di $p_B(k)$ attorno a valori k inferiori; valori di p ancora più piccoli producono una d.d.p. che decresce monotonamente per $k > 0$. Infine, osserviamo che non si possono avere più di N utenti al telefono.

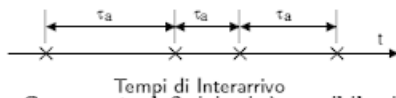
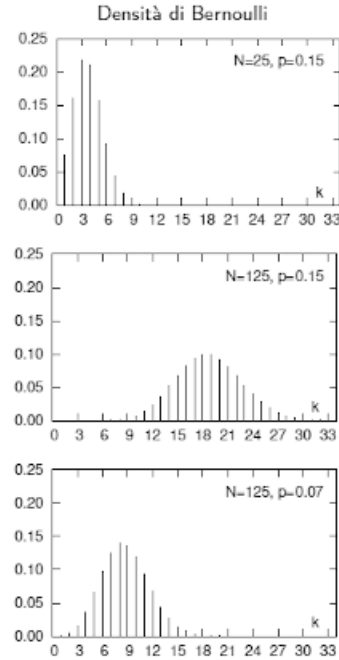
Per conoscere il numero di linee occorrenti a garantire una probabilità di *congestione* (o di blocco) P_B inferiore ad un massimo, si sommano (partendo da destra) i valori di probabilità $p_B(k)$, finché non si supera la probabilità prefissata: allora M sarà pari all'ultimo indice k . Infatti in tal modo la probabilità che ci siano più di M interni a voler telefonare è pari a

$$Pr(k > M) = \sum_{k=M+1}^N p_B(k) = \sum_{k=M+1}^N \binom{N}{k} p^k q^{N-k} < P_B$$

La distribuzione binomiale è detta anche *delle prove ripetute* poiché può essere usata per calcolare la probabilità di un certo numero di eventi favorevoli, a seguito della ripetizione dello stesso fenomeno aleatorio³.

Il valore medio della distribuzione Binomiale è $m_B = Np$, e la varianza $\sigma_B^2 = Npq$. Tornando al caso del centralino, il numero medio di linee occupate è Np : tale quantità rappresenta il *traffico offerto medio*, che si misura in ERLANG: ad esempio, un traffico medio di 3 Erlang corrisponde ad osservare in media 3 linee occupate.

Il rapporto $\frac{\sigma_B^2}{m_B} = \frac{Npq}{Np} = q < 1$ è un indice di come la variabile aleatoria si distribuisce attorno alla media. Il caso di Bernoulli in cui $\frac{\sigma_B^2}{m_B} < 1$ è rappresentativo di un traffico *dolce*, che deriva dall'ipotesi di popolazione finita, e che si sostanzia nel fatto che all'aumentare delle linee occupate, diminuisce la probabilità di una nuova chiamata, in quanto diminuiscono le persone *non* al telefono.



Con queste definizioni, è possibile riferire la v.a. di Poisson ad un intervallo temporale di osservazione T , durante il quale si presentano un numero medio α di chiamate⁷ pari a $\alpha = \lambda T$. Pertanto, possiamo scrivere la ddp della v.a. Poissoniana come

$$p_P(k)|_T = e^{-\lambda T} \frac{(\lambda T)^k}{k!}$$

che indica la probabilità che in un tempo T si verifichino k eventi (indipendenti e completamente casuali) la cui frequenza media è λ ⁽⁸⁾.

ed esattamente $\bar{\tau}_a = 1/\lambda$ è il *valor medio* della variabile aleatoria τ_a costituita dall'intervallo di tempo tra l'arrivo di due chiamate.

Mentre il processo di ingresso è descritto in termini della *frequenza media* di arrivo λ , il tempo medio di occupazione dei serventi (indicato come *processo di servizio*) è descritto nei termini del *tempo medio di servizio* τ_S , ovvero dal suo inverso $\mu = 1/\tau_S$, pari alla *frequenza media* di servizio. Nella trattazione seguente si fa l'ipotesi che entrambi i processi (di ingresso e di servizio) siano descrivibili in termini di v.a. a distribuzione esponenziale¹⁵, ovvero che le durate degli eventi "nuova richiesta" e "servente occupato" siano *completamente casuali*¹⁶.

Il rapporto $A_o = \frac{\lambda}{\mu}$ è indicato come *intensità media* del traffico *offerto*¹⁷ e descrive quanti serventi (in media) *sarebbero* occupati ad espletare le richieste arrivate e non ancora servite, nel caso in cui M fosse infinito. L'aggettivo *offerto* indica la circostanza che, essendo invece M finito, alcune richieste non sono accolte, ed A_o risulta diverso dal traffico A_s che può essere effettivamente *smaltito*. L'unità di misura dell'intensità di traffico è l'ERLANG, il cui valore indica appunto il numero medio di serventi occupati.

Esempio Ad un centralino giungono una media di $\lambda = 3$ chiamate al minuto, e la durata media di una conversazione è $1/\mu = 3$ minuti. In tal caso l'intensità media di traffico risulta $A_o = 3 \cdot 3 = 9$ Erlang, corrispondenti al potenziale impegno di una *media* di 9 centralinisti (e nove linee telefoniche).

17.4.1 Risultato di Little

Si tratta di un risultato molto generale, valido per qualsiasi distribuzione dei tempi di interarrivo e di servizio, la cui applicazione può tornare utile nell'analisi, e che recita:

Il numero medio $\bar{N}$ di utenti contemporaneamente presenti in un sistema di servizio è pari al prodotto tra frequenza media di smaltimento delle richieste λ_s ed il tempo medio di permanenza τ_p dell'utente nel sistema

e quindi in definitiva $\bar{N} = \lambda_s \cdot \tau_p$. Nell'applicazione al caso di servizi orientati alla perdita, si ha $\tau_p = \tau_S$, mentre nei servizi a coda risulta $\tau_p = \tau_c + \tau_S$ in cui τ_c rappresenta il tempo medio di coda.

Esercizio Un nodo di una rete per dati effettua la moltiplicazione di pacchetti di dimensione media di 8 KByte³¹ su collegamenti con velocità binaria $f_b = 100$ Mbps³²

- 1) Determinare il tempo medio di servizio di ogni singolo pacchetto;
- 2) determinare il tempo medio di interarrivo τ_a tra pacchetti corrispondente ad un traffico di ingresso di 1200 pacchetti/secondo, e l'associata intensità A_o ;
- 3) assumendo che la dimensione dei pacchetti sia una v.a. con densità esponenziale negativa, così come il tempo di interarrivo tra pacchetti, e che la memoria del moltiplicatore sia così grande da approssimare le condizioni di coda infinita, determinare il ritardo medio di un pacchetto, ossia il tempo medio trascorso tra quando un pacchetto si presenta in ingresso al nodo e quando ne esce;
- 4) calcolare la quantità di memoria necessaria ad ospitare i dati che si accumulano in un intervallo temporale pari al ritardo medio, considerando pacchetti di lunghezza fissa e pari alla media.

Risposte

- 1) Il tempo medio di servizio di un pacchetto è pari al tempo occorrente per trasmetterlo:

$$\tau_S = \frac{1}{\mu} = \text{durata di un bit} \cdot \frac{\text{bit}}{\text{pacchetto}} = \frac{1}{10^8} \left[\frac{\text{secondi}}{\text{bit}} \right] \cdot 1024 \left[\frac{\text{byte}}{\text{pacchetto}} \right] \cdot 8 \left[\frac{\text{bit}}{\text{byte}} \right] \simeq 655 \mu\text{sec};$$
- 2) $\tau_a = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1200} = 833 \mu\text{sec}$; $A_o = \frac{\lambda}{\mu} = 1200 \cdot 655 \cdot 10^{-6} = 0.786$ Erlang;
- 3) Le condizioni poste corrispondono a quelle di traffico poissoniano e sistema a singolo servente e coda infinita, per il quale la teoria fornisce per il tempo di permanenza il risultato $\tau_p = \frac{1}{\mu - \lambda_o} = \frac{1}{\frac{10^6}{655} - \frac{10^6}{833}} = \frac{1}{326} \simeq 3 \text{ msec}$;
- 4) La memoria necessaria è pari al prodotto tra il tempo medio di permanenza ed il numero di bit che si accumulano in quel periodo, ovvero $3 \cdot 10^{-3} [\text{sec}] \cdot 1200 \left[\frac{\text{pacch}}{\text{sec}} \right] \cdot 1024 \left[\frac{\text{byte}}{\text{pacch}} \right] \simeq 3.7 \text{ Kbyte}$.

Reti di trasmissione

Una **Rete** in generale è un **insieme di collegamenti** (linee) tra "nodi", in analogia con le reti da pesca ma senza la loro regolarità e simmetria. In matematica il corrispettivo della rete è il **grafo**. In alcuni casi le linee delle reti sono "**canali**" che trasportano **oggetti** (es. rete idrica, stradale, distribuzione gas, etc.) oppure **energia elettromagnetica**, come nel caso delle reti di trasmissione finalizzate alla telecomunicazione, di cui ci occupiamo qui.

Descrivere e classificare sinteticamente le reti di trasmissione è un compito molto difficile perchè sono aggregati che possono raggiungere un elevato grado di complessità. Fino all'inizio del millennio si potevano distinguere per costituzione le **reti telefoniche** da quelle **informatiche**. Oggi **tutte le reti sono digitalizzate** e quindi, almeno sul piano tecnologico, sono reti informatiche, anche se questo termine indica tradizionalmente reti di computer e di terminali dedicate a calcoli di vario genere (tipicamente amministrativo e contabile). Ma è chiaro che le centrali telefoniche odierne non sono altro che computer dotati di adeguata potenza di calcolo dedicati sostanzialmente all'instradamento (routing).

Possiamo ora cercare di evidenziare **alcuni aspetti rilevanti delle reti di trasmissione**.

Architettura. E' un termine ambiguo perchè viene correntemente usato con più significati:

- **Infrastruttura.** E' l'insieme dei collegamenti fisici e degli apparati di intradamento e/o utilizzazione (nodi). Una rete estesa è necessariamente gerarchica, ossia suddivisa in più livelli di subordinazione.

Dal punto di vista dell'estensione, nelle reti informatiche si distinguono **LAN** (Local Area Network), **MAN** (Metropolitan Area Network) e **WAN** (Wide Area Network). Le reti telefoniche sono gerarchizzate per zone territoriali, come sarà illustrato più oltre.

La **scalabilità**, ossia la capacità di poter essere estesa in modo economico nelle prestazioni, è una delle caratteristiche desiderabili in molti tipi di rete.

La "**ridondanza**", ottenuta duplicando (talvolta moltiplicando) apparati di rete e/o canali fisici (Disaster recovery) è un fattore che inerisce alla disponibilità ($A = \text{Availability}$) di un sistema, che è definita come $A = \text{UpTime} / (\text{UpTime} + \text{DownTime})$

- **Topologia.** La topologia di una rete è la forma dell'insieme delle connessioni fisiche possibili:

Punto - Punto (Point to point)

Stella (Star)

Linea (Line)

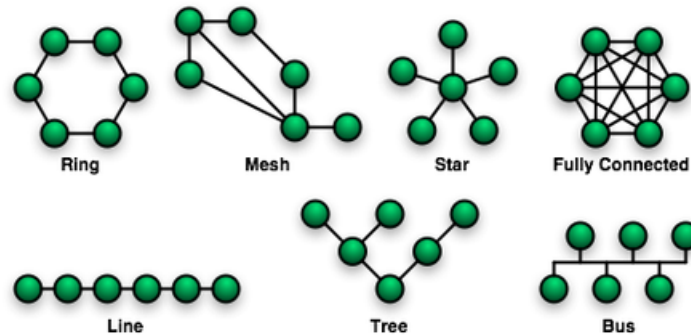
Bus

Albero (Tree)

Anello (Ring)

Maglie (Mesh)

Mista (combinazioni varie delle forme precedenti)



La topologia può essere **fisica** o **virtuale**, secondo che i canali siano di un tipo o dell'altro. Si può cioè realizzare una topologia a stella virtuale "appoggiata" su una topologia a maglie.

- **Architettura software.** E' la struttura dell'insieme dei moduli di programma che realizzano le funzionalità richieste al sistema. Un caso tipico è l'architettura dei protocolli di comunicazione ISO-OSI, descritta più oltre. Un altro caso riguarda i metodi di accesso (protocolli e tipi di segnale) alle LAN: Ethernet, Token Ring (ormai obsoleta), TCP/IP, ...
- **Servizi di rete.** Una rete fornisce principalmente un servizio di connettività, ma può farlo in modi e tempi differenziati a seconda delle esigenze e degli aspetti economici coinvolti. I modelli di comunicazione utilizzati sono sostanzialmente due:
 - **Peer to peer** (da pari a pari)
 - **Client server**, che è un modello simile al master slave. Il server (software) risponde alle richieste di servizio del client (software). Il termine server riferito ad una macchina hardware è relativo al fatto che quella macchina ospita uno o più server software relativi a diversi servizi di rete.

Esempi di servizi "tradizionali" relativi alle reti TCP/IP sono:

- E-mail: Server SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) porta 25; Server POP3 (Post Office Protocol ver. 3) porta 110
- Web: Server HTTP (Hyper-Text Transfer Protocol) porta 80
- Trasferimento file: Server FTP (File Transfer Protocol) porta 20 upload / 21 download
- Terminale remoto: Server Telnet porta 23

Oltre a ciò una rete può fornire altri servizi, come la fatturazione di alcuni utilizzi, la condivisione delle risorse (server, printer, file, etc.)

- **Gestione e manutenzione della rete.** E' un tema di primaria importanza e comprende vari aspetti:

Configurazione. E' necessaria la presenza di strumenti (il più possibile di tipo software) che consentano di configurare i collegamenti (interni ed esterni) secondo le esigenze operative.

Sicurezza. La rete deve disporre di strumenti di protezione verso il malware e gli attacchi informatici esterni e interni, in forma di apparati (Firewall) e di software "di guardia".

Monitoraggio. E' costituito da strumenti che rilevano il funzionamento della rete e la sua congruità rispetto agli obiettivi, in particolare l'allarmistica (sia immediata che di tendenza) e l'analisi statistica dei flussi di dati e dei comportamenti degli utenti

Manutenzione. E' uno dei punti critici di tutti i sistemi. Si distinguono vari tipi di manutenzione: **preventiva, migliorativa, correttiva.**

Un **canale** che nella topologia ad albero (o a bus) costituisce un "ramo", o che, nella topologia a stella è uno dei suoi "raggi" viene chiamato **tributario**. Questo termine è usato per i fiumi come sinonimo di *affluente* e si contrappone a *effluente* o *distributivo*, ossia il fiume principale che accoglie gli affluenti.

17.5.2.2 Principio di commutazione

È definito in base a come sono realizzate le due funzioni di *instradamento*, ovvero come individuare un percorso nella rete, e di *attraversamento*, ossia come permettere l'inoltro del messaggio tra le porte di ingresso e di uscita del commutatore.

Se l'*instradamento* (ROUTING) viene determinato una volta per tutte all'inizio del collegamento, il modo di trasferimento viene detto *con connessione*. Se al contrario l'instradamento avviene in modo indipendente per ogni pacchetto, il collegamento è detto *senza connessione* ed ogni pacchetto di uno stesso messaggio può seguire percorsi differenti.

L'*attraversamento* di un nodo di rete consiste invece nel *demoltiplicare* le informazioni in ingresso e moltiplicarle di nuovo su uscite diverse: ciò può avvenire mediante un *collegamento diretto* o per *immagazzinamento e rilancio*.

Sulla base di queste considerazioni, definiamo:



Commutazione di circuito: l'instradamento avviene una volta per tutte prima della comunicazione, e l'attraversamento impegna in *modo permanente ed esclusivo* le *risorse fisiche* dei nodi della rete; è il caso della telefonia, sia POTS che PCM³⁸.

Commutazione di pacchetto a circuito virtuale: L'instradamento è determinato *una volta per tutte* prima dell'inizio della trasmissione, durante una fase di *setup* delle risorse della rete ad essa necessarie, e conseguente ad una *richiesta di connessione* da parte del nodo sorgente. I pacchetti di uno stesso messaggio seguono quindi tutti uno stesso percorso, e l'attraversamento si basa sull'impegno di *risorse logiche*³⁹ ed avviene per *immagazzinamento e rilancio*. La trasmissione ha luogo dopo aver contrassegnato ogni pacchetto con un *identificativo di connessione* (IC) che individua un *canale virtuale*⁴⁰ tra coppie di nodi di rete, e che ne identifica l'appartenenza ad uno dei collegamenti in transito.

Le cose non sono cambiate di molto (da un punto di vista concettuale) con l'avvento della telefonia numerica: in tal caso, più segnali vocali sono campionati e quantizzati in modo sincrono, ed il risultato (numerico) è multiplato in una *trama PCM* (§ 19.3.1), in cui viene riservato un intervallo temporale per ognuno dei flussi tributari.

Classificazione tradizionale delle reti

Sono suddivise in tre categorie in base al contenuto dei messaggi trasportati:

- Reti **telefoniche**
- Reti **dati**
- Rete **radio e Tv**

Le prime due condividono in gran parte l'infrastruttura, mentre la terza la condivide solo in parte. Inoltre, a causa della digitalizzazione dilagante, la telefonia e i dati si vanno rapidamente fondendo in un unico tipo, mentre la distinzione rimane solo per le sorgenti e le destinazioni dei messaggi.

La prima rete di **telecomunicazione elettrica** (quella ottica "pura" si trova in Cina già nel IV secolo A.C. e poco dopo anche nell'impero romano, mentre il *telegrafo ottico* conosce una certa diffusione nella Francia del '700) è stata la **rete telegrafica** terrestre, una *rete dati*. Dopo vari esperimenti durante i primi decenni dell'800, nel 1837 viene realizzato il *telegrafo di Cooke and Wheatstone* in Gran Bretagna e un anno dopo quello di *Morse* negli Stati Uniti (che utilizzava un solo filo, a differenza degli altri). Il codice Morse fu ben presto adottato come codice internazionale. Negli anni successivi la rete telegrafica si è rapidamente sviluppata e, trasformata in "telex" con uso di telescriventi, è durata fino alla fine del secolo scorso.

Gli anni '80 del 1800 hanno visto l'invenzione del **radiotelegrafo** sia del **telefono** e relativa rete, mentre la rete delle trasmissioni **radio vocali** è partita più tardi, intorno agli anni '20 del 1900, e quella **televisiva** pochi anni dopo (ma l'invenzione è precedente a quella della radio). Negli stessi anni sono stati inventati il **fonografo**, e il **registratore magnetico**, i primi mezzi di registrazione e riproduzione del suono, che assumeranno sempre maggiore importanza anche nelle telecomunicazioni.

Durante il '900 la rete telefonica si è sviluppata in tutto il mondo, mentre le reti **dati** vere e proprie hanno avuto inizio con l'introduzione del computer nei primi anni '50, utilizzando l'infrastruttura telefonica attraverso l'impiego del **modem**.

Costituzionalmente le reti telefoniche sono reti a **commutazione di circuito**. La commutazione avviene in apparati detti **Centrali** (Telephone Exchange) e **Centralini** (PBX = Private Branch Exchange), a seconda della dimensione pubblica o privata.

Le **centrali** principali sono collegate tra loro a maglia tramite canali fisici dedicati (cavi e ponti radio), che, tramite la multiplazione, convogliano più canali virtuali. Alle centrali principali si collegano a stella centrali secondarie (eventualmente su più livelli) e a queste, sempre a stella, le utenze private (centralini o singoli telefoni): la rete telefonica ha una struttura **gerarchica**.

Sincronismo

La trasmissione di segnali digitali deve affrontare e risolvere la **sincronizzazione** di tali segnali. L'identificazione del singolo bit nella trasmissione ha infatti due dimensioni di identificazione: la tensione (o corrente) e la durata. Quest'ultima è molto più critica della prima, specialmente quando il flusso di bit è numeroso, cosa ormai prevalente dovunque. Il problema della sincronizzazione "di bit" consegue dal fatto che la durata di ogni bit è un **multiplo intero del periodo del clock** di sistema, la precisione del quale è un altro elemento critico.

Il problema non si porrebbe se in tutto l'universo fosse possibile utilizzare un solo clock che facesse da riferimento assoluto per tutti i sistemi esistenti e futuri. Poiché ciò è impensabile, bisogna contemplare l'uso di **clock sufficientemente precisi ma indipendenti**. Naturalmente si possono costruire reti abbastanza grandi completamente sincrone, se questo è conveniente, ma a una certa dimensione bisognerà fermarsi, perché gli Stati non possono essere costretti ad aderire ad un unico standard (anche se sarebbe desiderabile).

Si adottano poi metodi per **compensare le differenze di frequenza**, cercando di ottenere una frequenza media uguale per tutti, ottenuta partendo da una bit rate (bit/sec) più alta di quella richiesta in modo da poterla ridurre quando necessario.

Oltre alla **sincronizzazione "di bit"** è necessaria anche una **sincronizzazione** su un gruppo di bit detto "**parola di sincronismo**" (sync word). I bit di ogni canale tributario vengono sistemati in una sequenza strutturata detta "trama" e certamente non basta conoscere la quantità di bit che la compongono. Occorre individuare "dove" ha inizio, ossia con quali bit comincia. A questo provvede la parola di sincronismo, una particolare sequenza di bit scelta in modo che la probabilità di trovarla nel messaggio sia la più bassa possibile. Per ridurre tale probabilità non ci si accontenta di riconoscere una sola volta la suddetta parola, ma, prima di dare per acquisito il "sincronismo di trama", si vuole che quella parola venga **riconosciuta più volte di seguito**. Ciò introduce un inevitabile **ritardo**, che andrà valutato nel contesto della trasmissione.

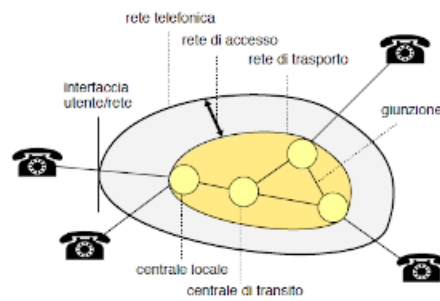
Reti a commutazione di circuito

I casi di trasmissione finora analizzati fanno riferimento a collegamenti *punto-punto*, in cui una unica sorgente di informazione intende comunicare con un unico destinatario. Nella realtà, è assai più frequente il caso in cui i soggetti coinvolti nella comunicazione affidino la stessa ad una *rete* di collegamento, consegnando il messaggio al *nodo* di commutazione a cui hanno accesso. Il messaggio quindi, una volta determinato un percorso di *attraversamento* che coinvolga i nodi della rete più opportuni, giunge al destinatario, grazie anche alla presenza di informazioni addizionali, dette *di segnalazione*.

Le nozioni che seguono fanno esplicito riferimento alle *reti di telefonia* per come si sono evolute a partire dalla fine dell'800, dette anche a *commutazione di circuito*, allo scopo di fornire una panoramica dei principali aspetti delle stesse. Altri aspetti legati alle *reti di trasmissione dati* saranno illustrati a seguito della trattazione relativa alla teoria del traffico, assieme alle reti a *commutazione di pacchetto*.

19.1.1 Elementi della rete telefonica

Con riferimento alla figura, si anticipa che discuteremo prima dei metodi di *multiplazione* che permettono alle diverse comunicazioni che terminano presso le *interfacce utente/rete* di essere aggregate da parte delle *centrali locali* per utilizzare un medesimo *collegamento di giunzione* interno alla *rete di trasporto*. Quindi, nel § 19.8 si esaminano i metodi di *commutazione* ed *instradamento* con cui viene individuato il percorso che una comunicazione deve intraprendere tra l'ingresso e l'uscita dalla rete di trasporto.



Rete di accesso

E' la parte più rilevante e *pesante* della rete, e consiste nel *doppino* in rame (pag. 432) che raggiunge la presa telefonica casalinga. All'interfaccia utente/rete sono così resi disponibili i servizi noti nel loro insieme come

- POTS (*Plain Old Telephone Service*) - vedi § 19.9.1;
- ISDN (*Integrated Service and Data Network*) - vedi § 19.9.2;
- ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) - che in realtà usa POTS solo come tramite per raggiungere una *rete IP* vedi § 19.9.4.

Oltre a questi, nella rete di accesso sono contemplate forme di collegamento anche diverse dal cavo, come

- accesso ottico - come nel caso FTTH o *Fiber To The Home* (vedi § 16.4.4.3), e che permette
 - di interconnettere un insieme più numeroso di collegamenti POTS già multiplati assieme, come nel caso di un grosso centralino aziendale, sovrapponendosi allo scopo di un accesso ISDN-PRI;
 - di interconnettersi ad una rete IP ad una velocità maggiore di quella consentita dalla tecnologia ADSL;
- accesso radio
 - GSM¹ - noto anche come sistema cellulare di seconda generazione², usa una rete diversa da PSTN, ma vi si interconnette in modo naturale. Il GSM nasce come standard aperto, favorendone la diffusione mondiale e l'interoperabilità tra gestori (*roaming*), e si sviluppa in forma completamente numerica, sia per la codifica vocale, che per il meccanismo di accesso multiplo al mezzo trasmissivo³, che adotta una organizzazione in trame; inoltre, ha introdotto la comunicazione dei messaggi SMS⁴;
 - GPRS⁵ e UMTS⁶ - mentre il primo (detto di *generazione 2.5*) usa la rete GSM per trasmettere dati a pacchetto, con velocità dell'ordine di 30-70 kbps, il secondo (detto anche di *terza generazione* o 3G) supporta in modo integrato sia le comunicazioni vocali, che i dati a pacchetto, con velocità dell'ordine dei 300 kbps, che salgono (teoricamente) a 3 e 14 Mbps con le estensioni UMTS 2+ e HSDPA rispettivamente;
 - WiFi⁷ e WiMax⁸ - mentre il primo distribuisce l'accesso ADSL su di un'area di estensione casalinga, il secondo ha una copertura di qualche chilometro, e permette collegamenti in mobilità. Entrambi permettono l'interconnessione ad un *Internet Service Provider* o ISP.

19.2 Multiplazione

In generale, raggruppare assieme più comunicazioni dirette alla medesima destinazione, in modo che condividano uno stesso mezzo trasmissivo, permette di

- tentare di occupare tutta la banda messa a disposizione dal mezzo trasmissivo
- massimizzare la percentuale di utilizzo del mezzo trasmissivo, nel caso di sorgenti non continuamente attive (vedi § 17.3.4)
- semplificare la gestione e la manutenzione dei collegamenti a lunga distanza, essendo questi minori in numero

Le tecniche di multiplazione, nella evoluzione storica delle telecomunicazioni, possono operare secondo le diverse modalità di

- *divisione di frequenza* - ogni comunicazione usa una banda di frequenze diversa, come descritto al § 9.1.1, nel contesto dello studio dei segnali modulati;
- *divisione di tempo* - le comunicazioni avvengono in intervalli di tempo disgiunti, mediante segnali numerici, e sono affrontate nel resto di questo capitolo;
- *divisione di codice* - tutte le comunicazioni usano la stessa banda allo stesso tempo, ma ogni diverso destinatario è ancora in grado di distinguere il proprio messaggio, in virtù della ortogonalità tra i codici utilizzati (vedi § 6.5.2). Dato che il segnale trasmesso in questo caso si trova ad occupare una banda più estesa di quella originaria, la tecnica è detta *ad espansione di spettro* ed esposta al § 14.9.

Multiplazione deterministica e commutazione di circuito La modalità usata nella rete telefonica è invece basata su di uno schema di multiplazione con organizzazione di trama (vedi § 17.5.2.1) che determina un paradigma noto come *commutazione di circuito*, per il motivo che ora illustriamo.

Alle origini storiche della telefonia, nell'epoca dei telefoni *a manovella*, con la cornetta appesa al muro, la commutazione si basava sull'operato di un centralinista umano, che creava un vero e proprio *circuito elettrico*, collegando fisicamente tra loro le terminazioni dei diversi utenti. Nel caso in cui intervenissero più centralinisti in cascata, la chiamata risultava instradata attraverso più centralini. Da allora, il termine commutazione di circuito individua il caso in cui



- è necessaria una fase di *setup* precedente alla comunicazione vera e propria, in cui vengono riservate le risorse;
- nella fase di setup si determina anche l'*instradamento* della chiamata nell'ambito della rete, che rimane lo stesso per tutta la durata della medesima;
- le risorse trasmissive restano impegnate in *modo esclusivo* per l'intera durata della conversazione.

Le cose non sono cambiate di molto (da un punto di vista concettuale) con l'avvento della telefonia numerica: in tal caso, più segnali vocali sono campionati e quantizzati in modo sincrono, ed il risultato (numerico) è multiplato in una *trama PCM* (§ 19.3.1), in cui viene riservato un intervallo temporale per ognuno dei flussi tributari.

Rete di trasporto

La **rete di trasporto** connette tutte le centrali attraverso **canali fisici dedicati, materiali (cavi metallici o ottici) e energetici (ponti radio)**. E' ovvio che anche

i cavi trasportano energia, ma hanno il vantaggio di utilizzare lo spazio in modo capillare (spesso più conveniente), laddove i ponti radio necessitano in generale di spazi aperti "a vista" tra trasmettitore e ricevitore; peraltro in certe situazioni (es. montagna) i Ponti radio sono di gran lunga più utilizzabili.

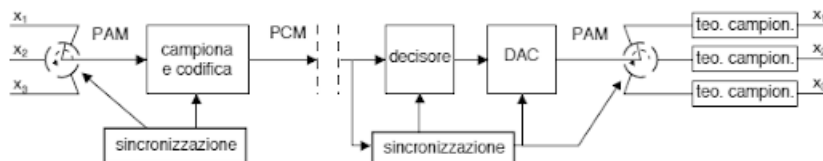
Precedentemente alla digitalizzazione, la rete di trasporto era costituita da canali analogici multiplati in **FDM**. Dagli anni '70 in Italia ha avuto inizio la trasformazione digitale che ha portato alla rete di trasporto detta **plesiocrona** (= quasi sincrona), che è poi stata gradualmente sostituita nelle parti principali dalla rete **sincrona**.

Rete Plesiocrona

Questo termine si riferisce alla modalità di funzionamento quasi-sincrona adottata dalle centrali telefoniche, almeno finché la rete di trasporto non è divenuta capace di realizzare una modalità di moltiplicazione sincrona (§ 19.4). In entrambi i casi, i segnali vocali sono trasportati in forma numerica, moltiplicandone i campioni a divisione di tempo in modo deterministico, in accordo ad una organizzazione di trama realizzata presso la centrale di accesso, come descritto di seguito.

19.3.1 Trama PCM

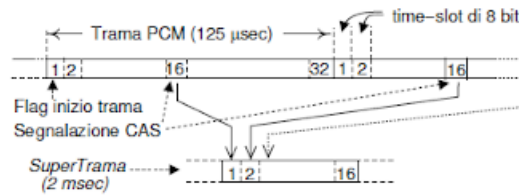
Nella figura seguente sono rappresentati tre segnali *tributari*, campionati a turno alla stessa frequenza di 8 KHz, quantizzati ad 8 bit per campione con quantizzazione logaritmica (vedi § 4.2.2), e trasmessi (8 bit alla volta⁹) a turno su di un unico collegamento, producendo un segnale binario che prende il nome di **PCM** (*Pulse Code Modulation*¹⁰). In figura è evidenziato inoltre un blocco di sincronizzazione (§ 19.3.3) necessario a ricostruire la corretta sequenza ricevuta, in modo da redistribuire correttamente i campioni ai filtri di restituzione.



La struttura temporale ripetitiva che ospita i campioni dei singoli tributari prende il nome di *trama* (FRAME¹¹), ed è composta da 32 intervalli temporali detti *time-slot*. Trenta di questi ospitano a turno i bit di un campione proveniente da un numero massimo di 30 tributari¹², mentre i rimanenti due intervalli convogliano le informazioni di segnalazione¹³, che indicano lo stato dei singoli collegamenti (il 16° intervallo) e forniscono il sincronismo relativo all'inizio della trama stessa (il primo). La velocità binaria complessiva risulta quindi di 32 intervalli * 8 bit/intervallo * 8000 campioni/secondo = 2048000 bit per secondo; per questo motivo, ci si riferisce all'insieme come alla *trama PCM a 2 Mbit*. D'altra parte, la durata della trama deve essere pari al periodo di campionamento, ossia $1/8000 = 125 \mu\text{sec}$.

Il primo time-slot della trama contiene una configurazione di bit sempre uguale, chiamata FLAG (*bandiera*, vedi § 17.5.2.1), che ha lo scopo di indicare ai circuiti di sincronismo l'inizio della trama stessa. I dati di segnalazione contenuti nel 16° intervallo devono essere *diluiti* su più trame, per poter rappresentare tutti i 30 tributari¹⁴. Si è stabilito che occorra prelevare il 16° intervallo di 16 trame successive, per ricostruire una struttura detta *supertrama* (di $16 \times 8 = 128$ bit) che rappresenta le informazioni di tutti i tributari (disponendo così di 4 bit/tributario/supertrama), e che si ripete ogni $16 \times 125 = 2000 \mu\text{sec} = 2 \text{ msec}$.

In effetti nel 16° time-slot della trama sono presenti a turno, oltre ai bit di segnalazione relativi allo stato dei tributari, anche bit necessari alla sincronizzazione della supertrama (ossia un *flag*), mentre le informazioni di segnalazione sono ripetute più volte nella stessa supertrama, per proteggersi da eventuali errori di ricezione, che danneggiando l'informazione sullo stato dei canali, potrebbero causare la "caduta della linea".



Segnalazione

Come illustrato al § 19.9.1, la rete di accesso è sede di uno scambio di informazioni tra terminale e centrale locale, detta *segnalazione di utente*, e che ha lo scopo di indicare la disponibilità della rete, il numero chiamato, l'attivazione della suoneria, ed i messaggi a ritroso di libero/occupato. Queste informazioni, quando devono essere propagate verso il lato-rete della centrale di accesso, possono essere gestite secondo due diversi approcci.

Segnalazione associata al canale

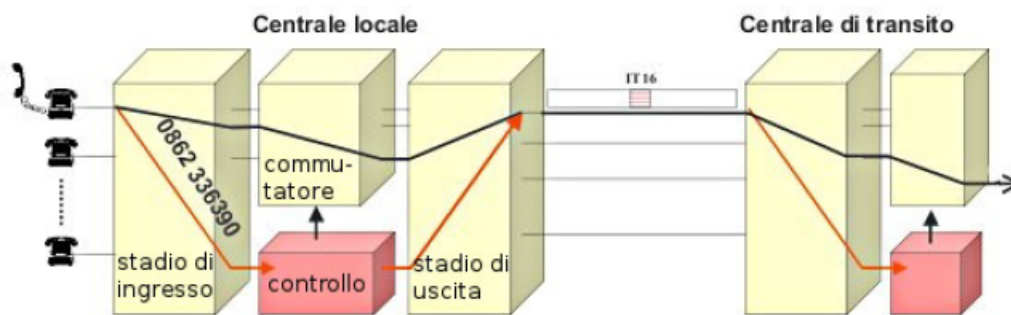


Figura 19.1: Controllo di centrale nel caso di segnalazione *associata al canale*

Segnalazione a canale comune

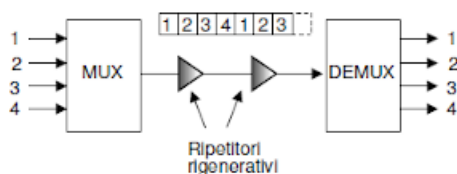


Figura 19.2: Separazione della segnalazione in un canale comune

Ripetitori

Nella trama PCM (§ 19.3.1), tutti i 30 canali sono campionati congiuntamente, e più flussi a 2 Mbit possono a loro volta essere "messi assieme" in modalità *bit interleaved* (prendendo un bit alla volta da ogni tributario) da appositi dispositivi *multiplatori* (o MULTIPLEXER, o MUX). Il collegamento può prevedere più dispositivi detti *ripetitori rigenerativi* (§ 15.3.2), che oltre ad amplificare il segnale, lo "puliscono" dal rumore accumulato, decodificando i dati in ingresso per poi generare ex-novo il segnale numerico.

Il problema con questo modo di procedere è che i singoli tributari possono ragionevolmente avere origine da centrali differenti, ognuno con un proprio orologio indipendente, e quindi le velocità possono essere lievemente differenti l'una dall'altra¹⁷, pur essendo molto simili. In questo caso si dice che la rete opera in modo *plesiocrono*, ossia *quasi isocrono* (ma non del tutto).



N. Canali	sigla	Vel. (kbps)	Teorica
30	E1	2.048	
120	E2	8.448	8.192
480	E3	34.368	32.768
1920	E4	139.264	131.072
7680	E5	565.148	524.288

In tabella riportiamo la gerarchia CCITT¹⁸, nota come *Plesiochronous Digital Hierarchy* (PDH), secondo la quale ad esempio 4 flussi da 2 Mbps (detti E1) sono multiplati in uno da 8 Mb/sec (E2): notiamo che sebbene siano teoricamente sufficienti 8192 Mb/sec, in realtà il Multiplexer ne produce di più (8448). Questo avviene proprio per permettere la trasmissione di segnali non necessariamente sincroni, mediante la tecnica del *bit stuffing*¹⁹.

Stuffing

Poichè gli apparati lavorano con clock autonomi, si pone il problema della sincronizzazione "di bit". Infatti, per quanto precisi, i vari clock saranno sempre leggermente diverse, ossia la loro differenza di fase crescerà nel tempo e farebbe perdere il sincronismo di bit.

Il problema viene risolto inserendo nella trama un bit "di stuffing" (riempimento) che non portano informazione e che, quando la differenza di fase tra il clock di trasmissione e il suo corrispondente

in ricezione supera una certa soglia, il bit viene eliminato dalla trama, recuperando così la fase. La fase subisce quindi variazioni temporali "a dente di sega", ma la frequenza media in ricezione si mantiene costante e la sincronizzazione di bit risulta corretta.

Add and Drop Multiplexer (ADM)

La modalità *bit interleaved* con cui è realizzata la gerarchia PDH è particolarmente problematica qualora di desideri estrarre e/o introdurre un singolo tributario da/in un segnale multiplexato di ordine elevato, ovvero realizzare una funzione detta *Add and Drop*. In questo caso è infatti necessario eseguire un'operazione inversa a quella di moltiplicazione, ovvero (vedi fig. 19.3) demultiplexare l'intero flusso, compresi tutti gli altri tributari, e successivamente ri-multiplexare di nuovo il tutto.

Questa caratteristica limita notevolmente la flessibilità delle configurazioni di rete che si possono ottenere con questa tecnologia, e per i tributari passanti comporta l'aggiunta di un tempo di ritardo addizionale dovuto alle operazioni di demultiplicazione e moltiplicazione. Nella pratica vengono usati solo flussi di tipo E1, E3 ed E4, che sono quelli più adatti per essere trasportati nella gerarchia sincrona SDH, moltiplicando direttamente sedici tributari a 2 Mbit/s all'interno di un unico flusso a 34 Mbit/s.

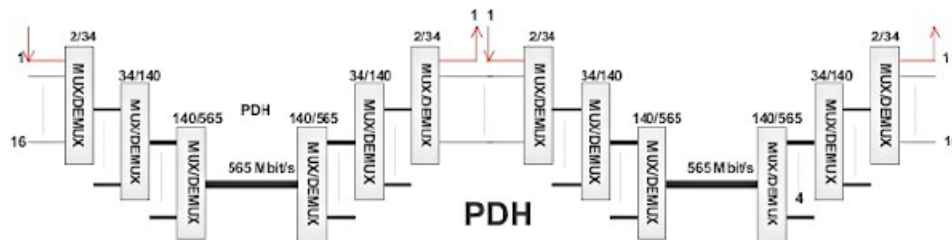
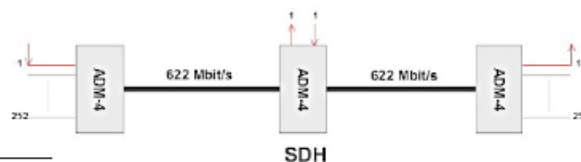


Figura 19.3: Gerarchia di moltiplicazione PDH e complessità di un ADM

Rete Gerarchica sincrona

Definizione dei livelli della gerarchia Come anticipato, la *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH²³) è una metodologia di moltiplicazione che presuppone un funzionamento perfettamente sincrono degli elementi di rete, ed ha solo una variante (nel Nord America), denominata SONET (*Synchronous Optical Network*), i cui livelli sono siglati STS oppure OC nel caso in cui ci si riferisca al segnale ottico corrispondente, e che interopera abbastanza bene con SDH. La tabella 19.1 elenca le velocità del *payload*²⁴ e di trasmissione associate ai diversi livelli della gerarchia di moltiplicazione SDH/SONET; la sigla STM sta per *synchronous transport module* ed il numero che segue indica il numero di flussi STM-1 che sono aggregati.

Multiplexer Add and Drop La differenza strutturale rispetto a PDH, è che in SDH i tributari usano tutti lo stesso clock, da cui deriva la possibilità di aggiungere e togliere un singolo tributario senza alterare il flusso in cui è immerso, come



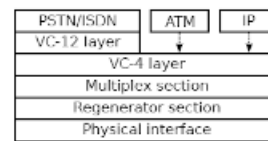
SONET	SDH	payload (kbps)	v. trasm. (kbps)
STS-1	-	48.960	51.840
STS-3	STM-1	150.336	155.520
STS-12	STM-4	601.344	622.080
STS-24	STM-8	1.202.688	1.244.160
STS-48	STM-16	2.405.376	2.488.320
STS-96	STM-32	4.810.752	4.976.640
STS-192	STM-64	9.621.504	9.953.280
STS-768	STM-256	38.486.016	39.813.120
STS-1536	STM-512	76.972.032	79.626.120

Tabella 19.1: Nomenclatura della gerarchia ottica e relative velocità

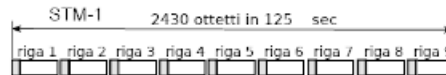
esemplificato in figura, in cui
252 flussi PDH E1 concorrono a formare un multiplex STM-4.

Eterogeneità del trasporto

SDH nasce allo scopo di consentire il trasporto di dati di diversa origine (PCM telefonico, ISDN, pacchetti Ethernet ed IP, celle ATM), come illustrato nella figura a fianco, che rappresenta impilate le diverse elaborazioni che i tributari devono subire per essere immessi nel flusso SDH.



Struttura di trama SDH si basa su di una struttura di trama di durata di 125 μ sec, durante i quali sono trasmessi in modalità *byte interleaved* una sequenza di ottetti provenienti da diversi tributari a 64 kbps che condividono la medesima sorgente di temporizzazione, cosicché ogni tributario può essere inserito o prelevato semplicemente scrivendo o leggendo sempre nello stesso punto (con la stessa fase) un ottetto ogni trama.



19.6.1 Dispositivi SDH

Come anticipato, la trasmissione SDH si avvale di elementi (vedi Fig. 19.5) che possono essere descritti in termini funzionali secondo la seguente classificazione:

Rigeneratori Sono gli elementi di base, che consentono di suddividere su più tratte i collegamenti più lunghi, e che eliminano dal segnale in transito gli effetti del rumore e della dispersione temporale.

Multiplicatori Combinano tributari PDH ed SDH, in modo da inserirli in flussi a velocità più elevate.

Multiplicatori Add and Drop Permettono l'inserimento e l'estrazione di tributari a bassa velocità in/da un flusso in transito, e consentono la creazione di strutture ad anello.

Digital Cross Connect A differenza di un ADM, un DXC è interconnesso a più di un flusso SDH, e quindi può inserire un tributario (od un container) prelevato da un flusso entrante, all'interno di un diverso flusso uscente, realizzando così la funzione di commutazione.

19.6.2 Topologia ad anello

Le reti in fibra ottica sono quasi sempre realizzate mediante degli *anelli* che congiungono tra loro i nodi di commutazione in forma ciclica. I dispositivi **DXC** (*Digital Cross Connect*) sono infatti interconnessi a più di un anello, e svolgono la funzione di commutazione delle comunicazioni che devono essere inoltrate verso gli altri anelli.

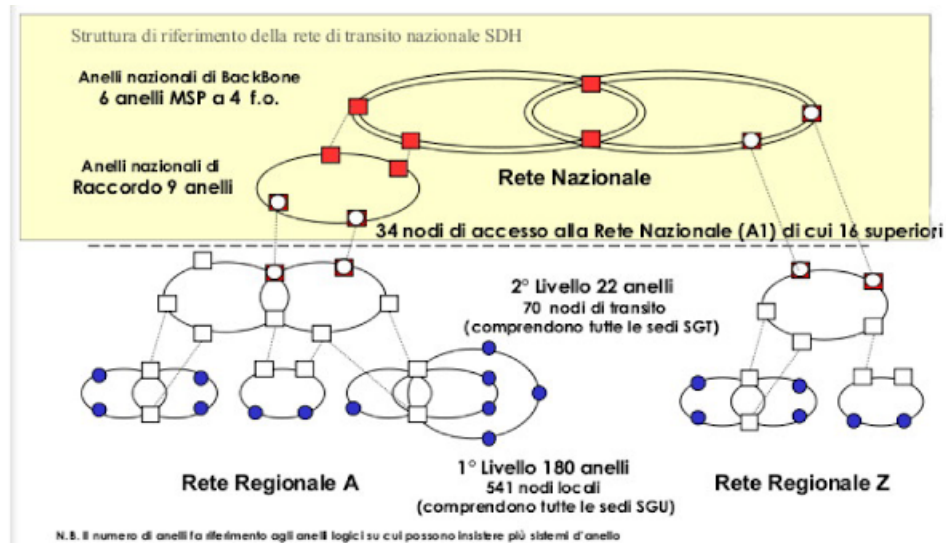
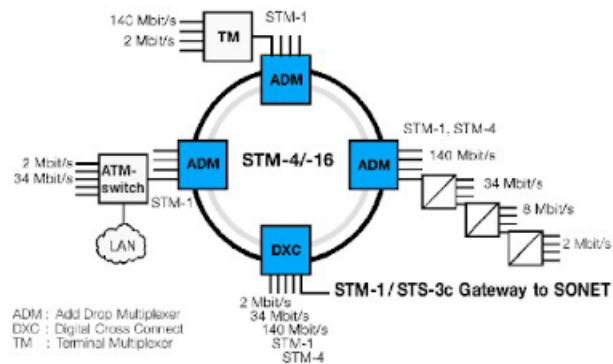


Figura 19.6: Struttura collegamenti SDH nazionali - anno 2002

19.6.2.1 Rete di trasporto

Al 2002, l'interconnessione dei collegamenti SDH nazionali risultava permessa dalla struttura su tre livelli riportata in Fig. 19.6.

A titolo illustrativo viene presentata la rete di accesso ottico del primo decennio.

19.6.2.2 Rete di accesso in fibra

La capacità del trasporto SDH di accettare tributari di tipo Ethernet o IP, facilita la realizzazione di una rete completamente ottica, anche nella sezione di accesso. La fig. 19.7 mostra alcuni casi pratici di accesso in fibra ottica. Iniziando da destra, sono mostrate delle reti Gigabit Ethernet (pag. 516) residenziali, interconnesse mediante *switch di livello 2* ad un POP (*Point of Presence*), il cui router (12000) si interconnette ad un anello SDH a 622 Mbps, sul quale sono instradati i pacchetti IP diretti verso Internet, per il tramite del POP primario. In basso a sinistra, sono mostrati accessi a due Megabit, contenenti sia traffico voce che dati, che vengono inseriti in anelli SDH da 155 Mbps: quello al centro inoltra i canali voce verso la PSTN, mentre quello di sinistra si interconnette nel *backbone IP* da 2.5 Gbps.

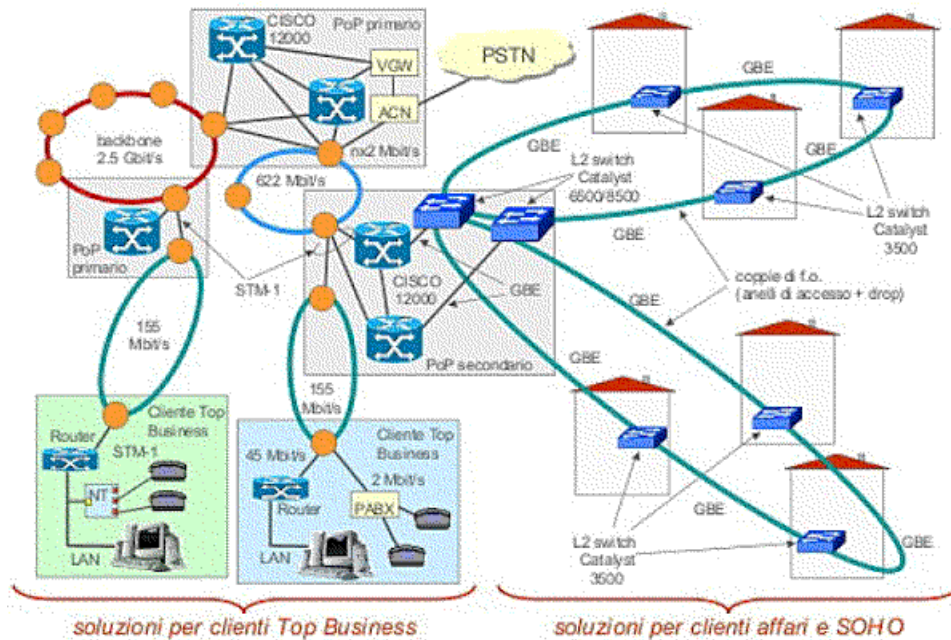


Figura 19.7: Diffusione della fibra ottica nella rete di accesso

Commutazione digitale

Le problematiche della **commutazione** vengono affrontate nelle centrali digitali tramite la **multiplazione a divisione di tempo**, cosa che prima di esse non era possibile e veniva utilizzata la tradizionale "**divisione di spazio**" tramite commutatori meccanici o, più recentemente, elettronici (specialmente nei PABX = Private Automatic Exchange, ossia i centralini) disposti a matrici interconnesse. La commutazione di spazio viene ancora utilizzata in combinazione con quella temporale.

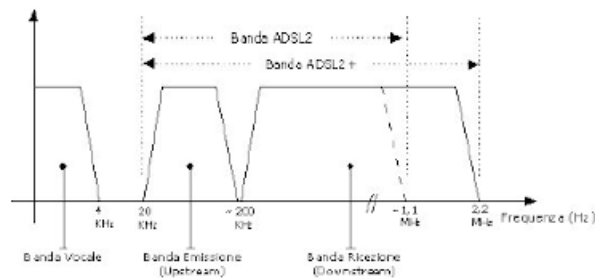
Non è il caso di entrare qui nei particolari. Riportiamo solo un esempio del libro.

Analizziamo i vantaggi conseguiti dalla commutazione numerica con un semplice esempio. Poniamo di voler commutare con lo schema illustrato 4 flussi PCM (con $n = 30$): $4 * 30 = 120$ canali presenti sono commutati utilizzando solo $4 * 4 = 16$ interruttori, contro i $120 * 120 = 14.400$ interruttori necessari ad una matrice spaziale monostadio che svolga la commutazione dei 120 canali analogici !

ADSL

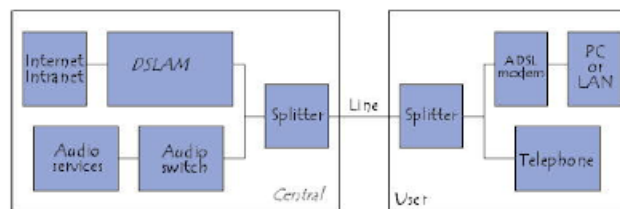
19.9.4 ADSL

L'*Asymmetric Digital Subscriber Line*⁵⁸ è l'insieme di tecnologie trasmissive e di rete per mezzo delle quali viene fornito l'accesso ad Internet *a banda larga* per il tramite del doppino telefonico (*subscriber loop*) in rame, già utilizzato per il normale servizio telefonico POTS. L'uso condiviso del mezzo è reso possibile realizzando la trasmissione numerica ADSL su di una banda di frequenze *più elevate* di quelle usate da POTS, come mostrato in figura, dove sono rappresentati gli intervalli di frequenza riservati alla telefonia PSTN, ai dati in uscita (*upstream*) ed in ingresso (*downstream*).



La massima velocità di trasmissione è stata inizialmente posta rispettivamente pari ad 1 ed 8 Mbps per i due versi trasmissivi, anche in funzione della lunghezza del collegamento utente - centrale⁵⁹; successivamente, la massima velocità di ricezione è stata elevata rispettivamente a 12 e 20 Mbit/sec per gli standard ADSL2 e ADSL2+.

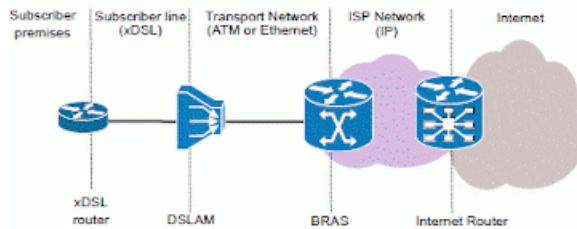
I due segnali (voce e numerico) sono poi separati su linee differenti⁶⁰ inserendo, a valle della presa telefonica casalinga, un doppio filtro passa-alto e passa-basso detto *splitter*⁶¹. Un



Lo splitter in casa utente è ormai quasi del tutto scomparso perchè la telefonia fissa viaggia ormai quasi dovunque insieme ai dati in VoIP (Voice over IP) e lo splitting per uso interno viene effettuato dal modem ADSL.

filtro del tutto simile esiste anche dal lato centrale, in modo da inoltrare la componente in banda audio alla centrale POTS, e la componente dati verso un dispositivo DSLAM.

DSLAM e oltre Il *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* risiede nella centrale dell'operatore che offre il servizio POTS, provvede ad effettuare la demodulazione del segnale ADSL di ogni singolo utente, e si occupa di aggregare il traffico relativo a più utenti ed inviarlo verso gli ISP (*Internet Service Provider*) con cui gli utenti hanno un contratto di connessione ad Internet.



A questo fine può essere necessario attraversare prima una rete di trasporto⁶² basata su ATM o ETHERNET, che termina il traffico sul *Broadband Remote Access Server* (BRAS)⁶³ dell'ISP, utilizzato da quest'ultimo anche per terminare il protocollo di strato di collegamen-

to PPP⁶⁴, svolgere le funzioni di autenticazione dell'accesso, ed applicare eventuali *policy* a livello IP. Quindi, l'ISP provvede ad interconnettere il traffico del cliente con la rete Internet. Alternativamente, l'ISP può disporre di un *Point of Presence* (POP) nella stessa centrale in cui sono ospitati i DSLAM dei propri clienti⁶⁵, che in questo caso producono direttamente traffico IP, inoltrato verso la *core network* dell'ISP usando la sua stessa connettività.

DMT Il modem ADSL utilizza una tecnica di modulazione numerica multi-portante detta *Discrete Multi Tone*, in cui il flusso binario viene ripartito su più canali di frequenza contigui, ed il segnale analogico sintetizzato direttamente nel dominio della frequenza mediante il calcolo di una FFT, come previsto dalla tecnica di trasmissione OFDM (vedi § 14.8). In questo modo, oltre a semplificare le operazioni di equalizzazione, è possibile variare la velocità di trasmissione in modo indipendente per le diverse portanti, e mantenere buone prestazioni anche nel caso in cui l'SNR vari con la frequenza.

⁶⁴PPP = Point to Point Protocol.

La situazione attuale ha visto un'**evoluzione della tecnologia ADSL** verso **VDSL** e **VDSL2** (**Very high speed DSL**, fino a 100 Mbps e 200 Mbps quando il doppino in rame non è lungo più di 300 metri), **EVDSL** (**Enhanced VDSL2**, fino a 400 Mbps su rete in rame di breve lunghezza) e **G.fast**, che permette di arrivare addirittura a 1 Gbps su reti di accesso in rame quando la lunghezza del doppino non supera i 100 metri. Per doppini di lunghezza compresa tra 100 e 200 metri si può arrivare fino a 500 Mbps. Un'ulteriore evoluzione è rappresentata da **XG-Fast** che dovrebbe consentire di arrivare fino a 10 Gbps quando il doppino fosse lungo meno di 100 metri. Queste prestazioni vengono ottenute utilizzando la banda rimanente del doppino e metodi più avanzati di protezione del segnale.

Ma, come si sa, l'utilizzo del doppino per "l'ultimo miglio" tende, nel medio termine, a ridursi, specialmente negli agglomerati urbani. E' chiaro che tale utilizzo sfrutta in modo efficiente la situazione pregressa della "vecchia" rete telefonica, basata sulle coppie intrecciate per i collegamenti tra utenza e centrale telefonica periferica. Tuttavia la **manutenzione** di questa rete diventa sempre più **costosa** e, dove le circostanze lo suggeriscono, si cerca di sostituire i doppini con le **fibre ottiche**, il cui rapporto costi/benefici è in continua diminuzione. In Italia, Tim dispone di due tipi di collegamento in fibra: **FTTC** (Fiber To The Cabinet) e **FTTH** (Fiber To The Home).

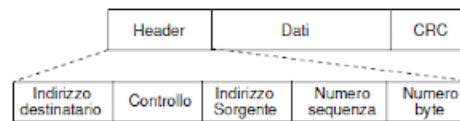
Reti dati

Le trasmissioni dati si prestano bene a comunicazioni in cui siano possibili ritardi temporali variabili, attuando una filosofia di tipo *ad immagazzinamento e rilancio* (STORE AND FORWARD) basata sul suddividere il messaggio in unità informative elementari denominate *pacchetti*, che possono essere inoltrati sulla rete di comunicazione, assieme a quelli prodotti da altre trasmissioni. L'applicazione della stessa metodologia a trasmissioni (ad esempio) vocali non è per nulla semplice, in quanto la presenza di un ritardo variabile per la trasmissione dei pacchetti comporta problemi non trascurabili, a meno di attuare speciali meccanismi di priorità e prenotazione della banda, tuttora oggetto di ricerca.

I dati vengono tenuti insieme in un "**pacchetto**", un raggruppamento strutturato che ai dati informativi veri e propri aggiunge una serie di dati "di servizio", le cui funzioni sono molteplici ma compensano l'appesantimento quantitativo che comportano.

In termini generali, un pacchetto è composto da una *intestazione* (HEADER), dalla parte di messaggio che trasporta (*dati*), e da un campo *codice di parità* (CRC) necessario a rivelare l'occorrenza di errori di trasmissione³³.

L'*header* a sua volta può essere suddiviso in campi, in cui trovano posto (tra le altre cose) gli *indirizzi* del destinatario e della sorgente, un *codice di controllo* che causa in chi lo riceve l'esecuzione di una procedura specifica, un *numero di sequenza* che identifica il pacchetto all'interno del messaggio originale, ed un campo che indica la *lunghezza* del pacchetto. Nonostante la presenza delle informazioni aggiuntive³⁴, la trasmissione a pacchetto consegue una efficienza maggiore di quella a circuito, in quanto è attuata mediante sistemi a coda.



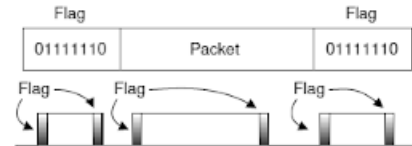
17.5.2 Modo di trasferimento delle informazioni

È definito in base alla specificazione di 3 caratteristiche che lo contraddistinguono: *lo schema di moltiplicazione*, *il principio di commutazione* e *l'architettura protocollare*.

17.5.2.1 Schema di moltiplicazione

Al § 19.3.1 è descritto uno schema a divisione di tempo che prevede l'uso di una *trama* in cui trovano posto diverse comunicazioni vocali³⁵, e che necessita di un funzionamento sincronizzato (o quasi) dei nodi di rete. La trasmissione *a pacchetto* invece non prevede l'uso esclusivo di risorse da parte delle singole comunicazioni, e *non fa uso* di una struttura di trama e pertanto occorrono soluzioni particolari per permettere la *delimitazione* dei pacchetti.

Ad esempio, i protocolli HDLC ed x.25³⁶ presentano pacchetti di dimensione variabile, e fanno uso di un byte di *flag* (vedi pag. 186) costituito dalla sequenza 01111110 in testa ed in coda, per separare tra loro i pacchetti di comunicazioni differenti. Per evitare che i dati "propri" del pacchetto possano simulare un flag, in trasmissione viene inserito un bit 0 dopo 5 uni di fila, che (se presente) viene rimosso al ricevitore. Se dopo 5 uni c'è ancora un 1 (e poi uno zero), allora è un flag.

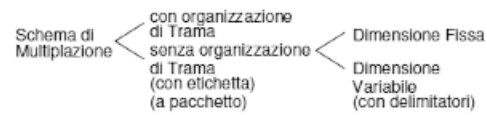


Nel caso in cui il pacchetto invece abbia una *dimensione fissa*³⁷, ci si trova ad operare in una situazione simile a quella in presenza di trama, tranne che... la trama non c'è, e dunque l'ordine dei pacchetti è qualsiasi, ma viene meno l'esigenza dei flag di delimitazione.



In entrambi i casi (lunghezza di pacchetto fissa o variabile) i nodi della rete non necessitano di operare in sincronismo tra loro; lo schema di moltiplicazione è quindi detto *a*

divisione di tempo senza organizzazione di trama, asincrono, con etichetta. Il termine *etichetta* (o *label*) indica che ogni pacchetto deve recare con sé le informazioni idonee a ricombinarlo assieme agli altri dello stesso messaggio.



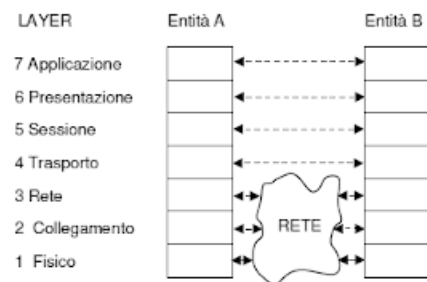
Commutazione di pacchetto a datagramma Anche in questo caso, *l'attraversamento* dei nodi avviene per *immagazzinamento e rilancio*, mentre la funzione di *instradamento* è svolta in modo distribuito tra i nodi di rete *per ogni pacchetto*, il quale (chiamato ora *datagramma*) deve necessariamente contenere l'indirizzo completo della destinazione. Infatti, in questo caso manca del tutto la fase iniziale del collegamento, in cui prenotare l'impegno delle risorse (fisiche o logiche) che saranno utilizzate⁴³. Semplicemente, non è previsto alcun impegno a priori, ed ogni pacchetto costituisce un collegamento individuale che impegna i nodi di rete solo per la durata del proprio passaggio. L'instradamento avviene mediante tabelle presenti nei nodi, di tipo sia statico che dinamico (nel qual caso tengono conto delle condizioni di carico e di coda dei nodi limitrofi) che indicano le possibili porte di uscita per raggiungere la destinazione scritta sul pacchetto. Quest'ultimo quindi viene fatto uscire *senza nessuna alterazione* dalla porta di uscita.

17.5.2.3 Architettura protocollare

Definisce la stratificazione delle funzioni di comunicazione, sia per gli apparati terminali che per i nodi di transito, e di come queste interagiscono reciprocamente sia tra nodi diversi, che nell'ambito di uno stesso nodo. Alcune di queste sono già state introdotte, e le citiamo per prime, seguite da quelle più rilevanti illustrate di seguito:

- il *controllo di flusso*, che impedisce la saturazione dei buffer;
- la *consegna ordinata*, per riassemblare messaggi frammentati su più datagrammi;
- la *segmentazione e riassemblaggio*, che definisce le regole per frammentare un messaggio in pacchetti e ricomporli, ad esempio in corrispondenza dei "confini" tra sottoreti con differente lunghezza di pacchetto;
- il *controllo di connessione*, che provvede ad instaurare la connessione, eseguire l'instradamento, impegnare le risorse, supervisionare il controllo di flusso, abbattere la connessione al suo termine;
- il *controllo di errore*, che provvede a riscontrare le unità informative, a rilevare gli errori di trasmissione, a gestire le richieste di trasmissione;
- l'*incapsulamento*, che aggiunge ai pacchetti di dati da trasmettere le informazioni di protocollo come l'header, gli indirizzi, il controllo di parità...

Stratificazione ISO-OSI Per aiutare nella schematizzazione delle interazioni tra le funzioni illustrate, l'*International Standard Organization* (ISO) ha formalizzato un modello concettuale per sistemi di comunicazione denominato *Open System Interconnection* (OSI)⁴⁶, che individua una relazione gerarchica tra i protocolli. In particolare sono definiti sette *strati* o *livelli* (LAYERS) ognuno dei quali raggruppa un insieme di funzioni affini. Gli strati più elevati (4-7) sono indicati anche come *strati di utente*, in quanto legati a funzioni relative ai soli apparati terminali; gli *strati di transito* invece (1-3) riguardano funzioni che devono essere presenti anche nei nodi intermedi.



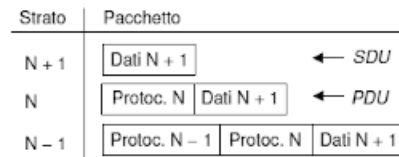
La relazione gerarchica individuata stabilisce tra due strati contigui un rapporto di tipo *utente-servizio*; ovvero lo svolgimento delle funzioni di strato superiore necessita dei servizi offerti dallo strato inferiore. A titolo di esempio, si pensi all'invio di un documento mediante un corriere espresso: ci si affida allora ad uno strato di trasporto che offre all'utente (strato di sessione) un servizio (appuntamento) di trasporto che ha il compito di "far apparire" il documento presso il destinatario.

La sede locale del corriere si affida quindi alla propria divisione interna che gestisce la rete dei corrispondenti, la quale si affida a sua volta ai corrispondenti stessi, che hanno il compito di assistere alla consegna ed all'arrivo (collegamento) del documento. Il trasferimento fisico dello stesso può quindi avvenire mediante un ultimo strato funzionale (treno, nave, aereo, auto...) che provvede al recapito in base alle informazioni ricevute dallo strato di collegamento.

Per terminare l'esempio, facciamo notare come in ogni livello avvengano *due* tipi di colloqui (regolati da altrettanti protocolli): uno è *orizzontale*, detto anche *tra pari* (PEER-TO-PEER), come è ad esempio il contenuto del documento che spediamo, od i rapporti tra corrispondenti locali (che nel caso di un sistema di comunicazione corrisponde allo strato di collegamento, relativo ai protocolli tra singole coppie di nodi di rete); il secondo tipo di colloquio avviene invece in forma *verticale*, o *tra utente e servizio*, in quanto per realizzare le funzioni di uno strato *utente* ci si affida ad un *servizio* di comunicazione offerto dallo strato inferiore (che a sua volta può avvalersi dei servizi degli altri strati ancora inferiori)⁴⁷.

Incapsulamento La modalità con cui un protocollo tra pari di strato N affida i suoi dati ad un servizio di strato $N - 1$, si avvale (nella commutazione di pacchetto) della funzione di *incapsulamento*, di cui viene data una interpretazione grafica alla figura seguente.

I dati che lo strato $N + 1$ vuol trasmettere al suo pari, indicati anche come *Service Data Unit* (SDU), sono prefissi dalle informazioni di protocollo necessarie alla gestione del collegamento tra entità allo strato N . Questa nuova unità informativa prende il nome di *Protocol Data Unit* (PDU) per lo strato N , e viene passata in forma di SDU al servizio di collegamento offerto dallo strato $N - 1$, che ripete l'operazione di incapsulamento con le proprie informazioni di protocollo, generando una nuova PDU (di strato $N - 1$). Pertanto, lo strato fisico provvederà a trasmettere pacchetti contenenti tutte le informazioni di protocollo degli strati superiori.



Indipendenza dei servizi tra pari dal servizio di collegamento Quando uno strato affida il collegamento con un suo pari allo strato inferiore, quest'ultimo può mascherare al superiore la modalità con cui viene realizzato il trasferimento.

Reti a pacchetto

La rete a pacchetto per eccellenza, anzi la rete delle reti è **Internet**. L'architettura di Internet è basata sul **modello a strati ISO OSI** visto prima. Ma i protocolli previsti dalla ISO OSI hanno avuto una diffusione piuttosto limitata a causa della loro pesantezza e si può dire che ormai non sono più in uso.

Al loro posto si sono diffusi **altri protocolli**, i più noti dei quali sono conosciuti come "**suite TCP/IP**"

Il modello ISO OSI costituisce comunque un **modello di riferimento** molto utile per la descrizione e l'evoluzione delle funzioni delle reti a pacchetto.

Internet

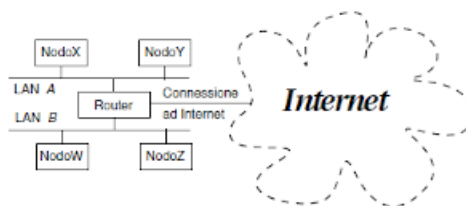
Storia Nel 1964 L. Kleinrock (UCLA) propone un modello di rete non gerarchica e con parti ridondanti, che realizza una modalità di trasferimento senza connessione e senza garanzie di qualità del servizio, rimandando queste ultime ai livelli superiori dell'architettura protocollare. Tale tipologia di servizio è oggi indicata con il termine *best effort*¹. Nel '69 sono operativi cinque nodi nelle università americane, e nel '72 avviene la prima dimostrazione pubblica di ARPANET, basata su NCP. Nel '73 Kahn e Cerf iniziano a definire TCP, da cui viene successivamente separato l'IP per la convenienza di non dover necessariamente aprire sempre una connessione. Fino all'80, il DoD² sovvenziona le università per implementare in ambiente UNIX i protocolli, che nel frattempo si vanno arricchendo di servizi, mentre la trasmissione Ethernet (del 1973) è

Nel 1983 il DoD decreta che tutti i calcolatori connessi a ARPANET adottino i protocolli TCP/IP, e separa la rete in due parti: una civile (ARPANET) ed una militare (MILNET). Negli anni seguenti i finanziamenti dalla *National Science Foundation* permettono lo sviluppo di una rete di trasporto a lunga distanza e di reti regionali, che interconnettono LAN di altre università e di enti di ricerca alla rete ARPANET, alla quale si collegano poi anche le comunità scientifiche non americane.

Nel 1990 ARPANET cessa le sue attività, e Berners-Lee (CERN) definisce il WWW, mentre nel '93 Andreessen (NCSA) sviluppa *Mosaic*, il primo *browser* WWW. Dal 1995 l'NSF non finanzia più la rete di interconnessione, ed il traffico inizia ad essere trasportato da operatori privati.

Caratteristiche La parola *Internet* in realtà è composta da due parole, INTER e NET, in quanto le caratteristiche della rete Internet sono quelle di fondere in una unica architettura una infinità di singole reti locali, potenzialmente disomogenee, e permettere la comunicazione tra i computer delle diverse sottoreti.

Ogni nodo della rete è connesso ad una rete locale (LAN³), la quale a sua volta è interconnessa ad Internet mediante dei nodi detti *router*⁴ che sono collegati ad una o più LAN e ad Internet, e svolgono la funzione di instradare le comunicazioni verso l'esterno. L'instradamento ha luogo in base ad un *indirizzo IP*⁵, che individua i singoli nodi in modo univoco su scala mondiale.



Come anticipato, lo strato di rete (o strato IP) realizza un modo di trasferimento a datagramma e non fornisce garanzie sulla qualità di servizio (QoS, QUALITY OF SERVICE) in termini di ritardi, errori e pacchetti persi. La situazione è mitigata dalla strato di trasporto (TCP, TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL) che offre ai processi applicativi un

servizio a circuito virtuale.

I protocolli di Internet sono realizzati in software e sono pubblici; gli utenti stessi e molte sottoreti private contribuiscono significativamente al trasporto, all'indirizzamento, alla commutazione ed alla notifica delle informazioni. Queste sono alcune ragioni fondamentali per cui Internet *non è di nessuno* ed è un patrimonio dell'umanità.

³LOCAL AREA NETWORK, ossia *rete locale*. Con questo termine si indica un collegamento che non si estende oltre (approssimativamente) un edificio.

⁴La funzione di conversione di protocollo tra reti disomogenee è detta di *gateway*, mentre l'interconnessione tra reti locali è svolta da dispositivi *bridge* oppure da *ripetitori* se le reti sono omogenee. Con il termine *router* si indica più propriamente il caso in cui il nodo svolge funzioni di instradamento, che tipicamente avviene nello *strato di rete*. Nel caso in cui invece si operi un instradamento a livello dello *strato di collegamento*, ossia nell'ambito di sezioni diverse (collegate da bridge o ripetitori) di una stessa LAN, il dispositivo viene detto *switch*. Infine, un *firewall* opera a livello di trasporto, e permette di impostare *regole di controllo* per restringere l'accesso alla rete interna in base all'indirizzo di *sorgente*, al tipo di *protocollo*, c/o a determinati *servizi*.

⁵IP = Internet Protocol.

Indirizzamento

La tabella sottostante riporta gli **strati (layer)** dei protocolli (pila protocollare) secondo il **modello ISO-OSI**, che, nel caso di Internet si presenta **semplificato**.

Lo strato "Collegamento" comprende i primi due strati del modello ISO-OSI, includendo anche il Fisico. Il quarto strato "Trasporto" include il 5, "Sessione", che viene svolto dal TCP. Infine lo strato 6 è incluso in quello applicativo, il 7.

Strato	Indirizzo
Applicazione	<i>protocollo://nodo.dominio.tld</i>
Trasporto	<i>socket TCP o porta</i>
Rete	<i>indirizzo IP x.y.w.z</i>
Collegamento	<i>indirizzo Ethernet a:b:c:d:e:f</i>

18.1.1.1 IP ed Ethernet

I computer connessi ad Internet (detti *nodi*) sono le sorgenti e le destinazioni dell'informazione, e sono individuati da un *indirizzo IP*, che consiste in un gruppo di 4 byte⁶ e che si scrive $x.y.w.z$ con ognuna delle 4 variabili pari ad un numero tra 0 e 255.

I nodi sono connessi alla rete mediante una interfaccia a volte indicata come MAC (MEDIA ACCESS CONTROL). Prendendo come esempio⁷ i nodi connessi ad una LAN Ethernet, l'interfaccia di rete è individuata a sua volta da un *indirizzo Ethernet* composto da 6 byte. Quest'ultimo è unico in tutto il mondo, ed impresso dal costruttore nella scheda di interfaccia. L'indirizzo Ethernet viene però utilizzato solo nell'ambito della LAN di cui il nodo fa parte, ossia dopo che i pacchetti sono stati instradati dai router, per mezzo dell'indirizzo IP, verso la LAN.

18.1.1.2 Sottoreti

Ogni nodo conosce, oltre al proprio indirizzo IP, anche una *maschera di sottorete* composta da una serie di uni seguita da zeri, in numero complessivo di 32 bit, tanti quanti ne sono presenti nell'indirizzo IP. Il termine *maschera* è dovuto all'operazione di AND binario (vedi tabella) operata tra la maschera e gli indirizzi IP, per determinare se questi appartengano alla propria stessa LAN oppure risiedano altrove.

Indirizzo IP	Maschera Sottorete	Indirizzo sottorete
151.100.8.33	255.255.255.0	151.100.8.0

Nel caso in cui la sottorete di un nodo Y verso cui il nodo X deve inviare un pacchetto è la stessa su cui è connesso X, allora questi può individuare l'indirizzo Ethernet del destinatario⁸ ed inviargli il pacchetto direttamente. In caso contrario, X invierà il pacchetto al proprio *default gateway* verso Internet.

18.1.1.3 Intranet

Alcuni gruppi di indirizzi IP (come quelli $192.168.w.z$ oppure $10.y.w.z$) non vengono instradati dai router, e possono essere riutilizzati nelle *reti private* di tutto il mondo per realizzare le cosiddette *reti intranet* operanti con gli stessi protocolli ed applicativi che funzionano via Internet.

18.1.1.4 Domain Name Service (DNS)

L'utente di una applicazione internet in realtà non è a conoscenza degli indirizzi IP dei diversi nodi, ma li identifica per mezzo di nomi simbolici del tipo *nodo.dominio.tld*, detti anche *indirizzi Internet*. Il processo di risoluzione che individua l'indirizzo IP associato al nome avviene interrogando un particolare nodo, il DOMAIN NAME SERVICE (*servizio dei nomi di dominio*). La

struttura dei nomi, scandita dai punti, individua una gerarchia di autorità per i diversi campi. Il campo tld è chiamato *dominio di primo livello* (TOP LEVEL DOMAIN⁹), mentre il campo dominio in genere è stato registrato da qualche organizzazione che lo giudica rappresentativo della propria offerta informativa. Il campo nodo rappresenta invece una ben determinata macchina, il cui indirizzo Internet completo è nodo.dominio.tld, e che non necessariamente è collegato alla stessa LAN a cui sono connessi gli altri nodi con indirizzo che termina per dominio.tld.

Quando un nodoX generico deve comunicare con nodoY.dominio.tld, interroga il proprio DNS¹⁰ per conoscerne l'IP. Nella rete sono presenti molti DNS, alcuni dei quali detengono informazioni *autorevoli*¹¹ riguardo ai nodi di uno o più domini, altri (i DNS *radice*, o ROOT) detengono le informazioni relative a quali DNS siano autorevoli per i domini di primo livello, ed altri fanno da tramite tra i primi due ed i *client* che richiedono una risoluzione di indirizzo. Se il DNS di nodoX *non è autorevole per* nodoY, allora¹² provvede ad inoltrare la richiesta, interrogando prima un DNS radice per individuare chi è autorevole per .tld, quindi interroga questo per trovare chi è autorevole per .dominio.tld, e quindi usa la risposta ottenuta per dirigere la richiesta di risoluzione originaria. Se la cosa può sembrare troppo macchinosa per funzionare bene, è perché la stessa sequenza di operazioni *non deve* essere effettuata sempre: il DNS utilizzato da nodoX riceve infatti, assieme all'IP di nodoY, anche una informazione detta TIME TO LIVE (TTL o *tempo di vita*) che descrive la scadenza della coppia *nome-IP* ottenuta. Genericamente il TTL è di qualche giorno, e fino alla sua scadenza il DNS *ricorda*¹³ la corrispondenza, in modo da fornire la propria copia in corrispondenza delle richieste future, e ridurre sensibilmente il traffico legato alla risoluzione degli indirizzi Internet. L'insieme delle risoluzioni apprese è denominata *cache* del DNS¹⁴.

TCP = Transport Control Protocol

18.1.1.5 Indirizzi TCP

Si è detto che ogni nodo è individuato in Internet mediante il proprio indirizzo IP, ma questo non è sufficiente ad indicare con quale particolare programma (che può essere uno specifico *server* come nel caso del DNS) si vuole entrare in comunicazione. I programmi che sono pronti a ricevere connessioni si pongono *in ascolto* su ben determinate *porte* (o *socket*¹⁵), identificate da numeri¹⁶, e che sono referenziati in modo simbolico (es. *http://*, *ftp://*) dagli applicativi di utente che si rivolgono allo strato di trasporto (il TCP) per stabilire un collegamento con un server presente su di un nodo remoto.

Alcuni servizi rispondono ad indirizzi *ben noti*, fissi per tutti i nodi, in quanto il chiamante deve sapere a priori a quale porta connettersi. Il nodo contattato invece, apre con il chiamante una connessione di ritorno, su di un numero di porta diverso, che è stato comunicato dal chiamante al momento della richiesta di connessione, e per il quale il chiamante non ha già aperto altre connessioni differenti.

18.1.2 TCP

Discutiamo ora del TCP¹⁷, che offre ai processi applicativi un servizio di trasporto a circuito virtuale, *attaccato* ad una porta¹⁸ di un nodo remoto individuato dall'indirizzo IP. Il suo compito è quello di ricevere dai processi applicativi dei dati, suddividerli in pacchetti, ed inviarli al suo pari che svolge il processo inverso.

La struttura di un pacchetto TCP è mostrata in figura, e comprende una intestazione composta da 6 gruppi (o più) di 4 byte per un minimo di 192 bit, a cui segue un numero variabile di gruppi di 4 byte di Dati, provenienti dagli strati applicativi superiori.

Troviamo subito i numeri delle porte a cui si riferisce la connessione, mentre gli indirizzi IP sono aggiunti dallo strato di rete. I numeri di Sequenza e di Riscontro servono rispettivamente a numerare i bytes dei pacchetti uscenti, ed a notificare l'altro lato del collegamento del numero di sequenza del prossimo byte che si aspetta di ricevere¹⁹, riscontrando implicitamente come correttamente arrivati i pacchetti con numero di sequenza più basso.

1	8	16	24
Porta Sorgente		Porta Destinazione	
Numero di Sequenza (Tx)			
Numero di Riscontro (Rx)			
Offset	Riserva	Contr.	Finestra
Checksum		Puntatore Urgente	
Opzioni		Riempimento	
Dati			
Dati			
...			

Offset (4 bit) codifica il numero di parole da 4 byte dell'intestazione, mentre nei 6 bit *Riservati* non è mai stato scritto nulla. I 6 bit del campo *Controllo* hanno ognuno un nome ed un significato preciso, qualora posti ad uno. Il primo (URG) indica che il campo urgent pointer contiene un valore significativo; ACK indica che si sta usando il Numero di Riscontro; RSH indica un pacchetto urgente che non può rispettare la coda in ricezione; RST segnala un malfunzionamento e impone il reset della connessione; SYN è pari ad uno solo per il primo pacchetto inviato per richiedere di creare una connessione; FIN indica che la sorgente ha esaurito i dati da trasmettere.

I 16 bit di *Finestra* rappresentano il numero di byte che, a partire dal numero espresso dal *Numero di Riscontro*, chi invia il pacchetto è in grado di ricevere, ed il suo utilizzo sarà meglio illustrato tra breve nel contesto del controllo di flusso. Il *Checksum* serve al ricevente per verificare se si sia verificato un errore, il *Puntatore Urgente* contiene il numero di sequenza dell'ultimo byte di una sequenza di dati urgenti, e le *Opzioni* (di lunghezza variabile) sono presenti solo raramente, ed utilizzate a fini di controllo, ad esempio per variare la dimensione della finestra. Infine, il *Riempimento* conclude l'ultima parola da 32 bit.

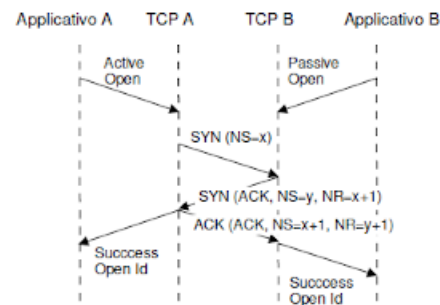
Uno stesso pacchetto TCP può svolgere funzioni di sola segnalazione, o di sola trasmissione dati, od entrambe.

Connessione con nodo remoto

18.1.2.2 Apertura e chiusura della connessione

Il TCP offre un servizio di di trasporto a circuito virtuale, e prima di inviare dati, deve effettuare un colloquio iniziale con il nodo remoto di destinazione. In particolare, il colloquio ha lo scopo di accertare la disponibilità del destinatario ad accettare la connessione, e permette alle due parti di scambiarsi i rispettivi numeri di sequenza descritti alla nota 19.

L'estremo che viene "chiamato" riveste il ruolo di *server*, e l'altro di *client*. Dato che anche quest'ultimo deve riscontrare il numero di sequenza fornito dal server, occorrono tre pacchetti per terminare il dialogo, che prende il nome di THREE WAY HANDSHAKE²⁰. Il diagramma a lato mostra l'evoluzione temporale del colloquio tra un processo applicativo client (A), ed un server (B) che si pone in ascolto, mostrando come al primo SYN che pone $NS_A = x$, ne segua un altro che pone $NS_B = y$, seguito a sua volta dall'ACK di chi ha iniziato²¹. La chiusura può avvenire per diverse cause: o perché è terminato il messaggio, segnalato dal bit FIN, o per situazioni anomale, che il TCP indica con il bit RST.



¹⁸Il numero di porta costituisce in pratica l'*identificativo di connessione* del circuito virtuale. Nel caso in cui un server debba comunicare con più client, dopo avere accettato la connessione giunta su di una *porta ben nota*, apre con i client diversi canali di ritorno, differenziati dall'uso di porte di risposta differenti.

La lista completa dei servizi standardizzati e degli indirizzi ben noti (*socket*) presso i quali i serventi sono in attesa di richieste di connessione, è presente in tutte le distribuzioni Linux nel file */etc/services*.

¹⁹Il numero di sequenza si incrementa ad ogni pacchetto di una quantità pari alla sua dimensione in bytes, ed ha lo scopo di permettere le operazioni di controllo di flusso. Il valore iniziale del numero di sequenza e di riscontro è diverso per ogni connessione, e generato in modo pseudo-casuale da entrambe le parti in base ai propri orologi interni, allo scopo di minimizzare i problemi dovuti all'inaffidabilità dello strato di rete (l'IP) che può perdere o ritardare i datagrammi, nel qual caso il TCP trasmittente ri-invia i pacchetti precedenti dopo un time-out. Questo comportamento può determinare l'arrivo al lato ricevente di un pacchetto duplicato, e consegnato addirittura dopo che la connessione tra i due nodi è stata chiusa e riaperta. In tal caso però la nuova connessione adotta un diverso numero di sequenza iniziale, cosicché il pacchetto duplicato e ritardato risulta fuori sequenza, e non viene accettato.

Il protocollo TCP provvede anche a:

- **Controllo di errore** (tramite reinvio dei pacchetti)
- **Controllo di flusso** (tramite il meccanismo *Sliding Window*)
- **Controllo di congestione** (riduzione del carico di rete)

Il TCP viene sostituito dal **protocollo UDP** (User Datagram Protocol) quando i controlli suddetti non sono necessari (ad esempio in condizioni di trasmissione protetta e quando si può operare senza connessione).

IP = Internet Protocol

La struttura di un pacchetto TCP è mostrata in figura, e comprende una intestazione composta da 6 gruppi (o più) di 4 byte per un minimo di 192 bit, a cui segue un numero variabile di gruppi di 4 byte di Dati, provenienti dagli strati applicativi superiori.

Troviamo subito i numeri delle porte a cui si riferisce la connessione, mentre gli indirizzi IP sono aggiunti dallo strato di rete. I numeri di Sequenza e di Riscontro servono rispettivamente a numerare i bytes dei pacchetti uscenti, ed a notificare l'altro lato del collegamento del numero di sequenza del prossimo byte che si aspetta di ricevere¹⁹, riscontrando implicitamente come correttamente arrivati i pacchetti con numero di sequenza più basso.

1	8	16	24
Porta Sorgente		Porta Destinazione	
Numero di Sequenza (Tx)			
Numero di Riscontro (Rx)			
Offset	Riserva	Contr.	Finestra
Checksum		Puntatore Urgente	
Opzioni		Riempimento	
Dati			
Dati			
...			

Offset (4 bit) codifica il numero di parole da 4 byte dell'intestazione, mentre nei 6 bit *Riservati* non è mai stato scritto nulla. I 6 bit del campo *Controllo* hanno ognuno un nome ed un significato preciso, qualora posti ad uno. Il primo (URG) indica che il campo urgent pointer contiene un valore significativo; ACK indica che si sta usando il Numero di Riscontro; RSH indica un pacchetto urgente che non può rispettare la coda in ricezione; RST segnala un malfunzionamento e impone il reset della connessione; SYN è pari ad uno solo per il primo pacchetto inviato per richiedere di creare una connessione; FIN indica che la sorgente ha esaurito i dati da trasmettere.

I 16 bit di *Finestra* rappresentano il numero di byte che, a partire dal numero espresso dal *Numero di Riscontro*, chi invia il pacchetto è in grado di ricevere, ed il suo utilizzo sarà meglio illustrato tra breve nel contesto del controllo di flusso. Il *Checksum* serve al ricevente per verificare se si sia verificato un errore, il *Puntatore Urgente* contiene il numero di sequenza dell'ultimo byte di una sequenza di dati urgenti, e le *Opzioni* (di lunghezza variabile) sono presenti solo raramente, ed utilizzate a fini di controllo, ad esempio per variare la dimensione della finestra. Infine, il *Riempimento* conclude l'ultima parola da 32 bit.

Uno stesso pacchetto TCP può svolgere funzioni di sola segnalazione, o di sola trasmissione dati, od entrambe.

18.1.3.2 Indirizzamento e Routing

A pagina 505 si è anticipata la relazione che lega la parte iniziale dell'indirizzo IP ad una determinata sottorete, in modo da partizionare i 2^{32} indirizzi su di una gerarchia a due livelli e delegare la consegna all'host finale ad uno o più router responsabili di servire la sottorete³¹. In realtà la gerarchia presenta una ulteriore suddivisione, dettata sia da esigenze amministrative che funzionali.

I bit più significativi dell'indirizzo IP identificano 5 diversi gruppi (o *classi*) di indirizzi, descritti dalla seguente tabella:

Inizio IP addr	Classe	bit rete/nodo	N. reti	N. nodi per rete
0	A	7/24	128	16 777 216
10	B	14/16	16 384	65 536
110	C	21/8	2 097 152	256
1110	D	28 bit di indirizzo multicast per 268 435 456 canali		
11110	E	27 bit per usi futuri e ricerca		

Quando una organizzazione decide di essere presente in internet, richiede l'assegnazione di un lotto di indirizzi IP ad appositi organismi, i quali attribuiscono all'organizzazione un gruppo di indirizzi di classe A, B o C in base al numero di nodi che l'organizzazione prevede di mettere in rete. Una rete in classe B ad esempio è individuata da 14 bit (ossia, assieme ai bit di classe, dai primi due bytes dell'indirizzo IP), e quindi esistono $2^{14} = 16384$ diverse reti in classe B, ognuna con una capacità di $2^{16} = 65536$ diversi nodi. Chi è intestatario di un gruppo di indirizzi, provvede ad assegnarli ai singoli nodi della propria sottorete.

"Gli **indirizzi pubblici IPv4, IPv6 e Multicast** sono detenuti e gestiti da un'Autorità pubblica, detta **IANA**-Internet Assigned Numbers Authority, che li assegna a pagamento. Dalla metà degli anni '90, IANA ha delegato ad altri Enti di registrazione (RIRs-Regional Internet Registries) la gestione dei rimanenti indirizzi IPv4 di Classe A, B e C (vedere anche la Domanda sugli Enti di standardizzazione di Internet, i vari link ai siti e le [RFC 1466](#) e 2050): AfrNIC-African Network Information Centre; APNIC-Asia Pacific NIC; LACNIC-Latin-American and Caribbean NIC; ARIN-American Registry for Internet Numbers; RIPE-Réseaux IP Europeans NCC, ecc."

L'**indirizzamento** applicato **nella pratica** prevede la suddivisione di una rete in **sottoreti** (Subnet Masking), in modo da suddividere il traffico secondo le esigenze locali. A un certo punto negli anni '90 (o forse già da prima) emerse chiaramente che la disponibilità di indirizzi IP, che nella versione IPv4 (la cui struttura di pacchetto è stata descritta sopra) sembravano tanti ($2^{32}-1$, circa 4 miliardi), diventava scarsa. Fu prodotta allora (anno 2004) la **nuova versione IPv6**, con una disponibilità di indirizzi enorme ($2^{128}-1$), che diventò operativa nel 2008.

Secondo un articolo del Novembre 2019 (<https://www.corrierecomunicazioni.it/digital-economy/ipv4-finiti-gli-indirizzi-accelerare-sullipv6-per-sostenere-liot/>) "In Nord America gli indirizzi Ipv4 si erano quasi esauriti già nel 2015. Iana, la Internet assigned numbers authority, e i vari registri regionali spingono da anni i provider Internet e le società di telecomunicazioni a migrare reti e clienti su Ipv6. Ma non tutti i paesi sono stati ugualmente veloci nella transizione: secondo le statistiche pubblicate da Google, la Germania guida con un tasso di adozione oltre il 44%, cui si avvicina la Grecia al 43%, la Francia è al 34%, ma fanno bene anche Uk, Irlanda, Portogallo e Finlandia; l'Italia arranca e si trova poco sopra il 4%. Su scala globale, gli Stati Uniti hanno un tasso

di adozione del 35%, l'India del 38%, il Giappone del 31%; anche Brasile, Canada e Messico sono ben posizionati così come alcuni paesi del sud-est asiatico: Tailandia, Malesia, Vietnam".

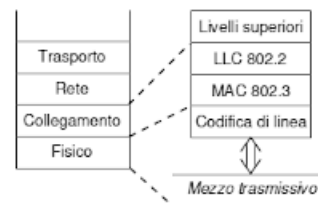
Nella pratica si usa la tecnica del NAT (Network Address Translator). Wikipedia: "Storicamente il NAT si è affermato come mezzo per ovviare alla scarsità di indirizzi IP pubblici disponibili, soprattutto in quei paesi che, a differenza degli USA, hanno meno spazio di indirizzamento IP allocato pro-capite. Considerato che spesso gli indirizzi IP pubblici statici hanno un prezzo, per molti utenti Internet questo costo di indirizzi IP extra non sarebbe stato compensato dai benefici che avrebbero potuto ricavare. Viene quindi utilizzato un IP pubblico dinamico gestito dall'ISP (Internet Service Provider). Le tecniche utilizzate per risparmiare indirizzi IP pubblici rendono i dispositivi non direttamente raggiungibili da internet, per cui spesso questa configurazione viene scelta per ragioni di sicurezza, anche se il NAT non è stato pensato per funzionare come sistema di protezione, per cui rimane sempre meno efficace rispetto ad un firewall."

Ethernet

Ci occupiamo qui di un caso particolare di realizzazione dei primi due livelli del modello ISO-OSI. Come anticipato a pag. 505, molti nodi di Internet sono univocamente individuati da un indirizzo (Ethernet) di 6 byte che, sebbene sia unico al mondo, viene usato solamente nell'ambito della LAN a cui il nodo è connesso, in quanto la distribuzione mondiale degli indirizzi Ethernet è casuale³⁸: se infatti questi fossero usati come indirizzi a livello di rete, le tabelle di instradamento dovrebbero essere a conoscenza di *tutti* i nodi esistenti³⁹. Puntualizziamo inoltre che un nodo di Internet può essere connesso alla rete anche per via telefonica, o con svariati altri metodi; ci limitiamo qui a descrivere il caso delle LAN Ethernet, peraltro particolarmente diffuso.

Ethernet individua un particolare tipo di pacchetto dati, adottato inizialmente dalla Xerox, adatto ad incapsulare dati provenienti da protocolli diversi. Successivamente, il formato è stato standardizzato dall'IEEE, e per ciò che ci interessa le specifiche sono quelle identificate dalle sigle 802.2 (LOGICAL LINK CONTROL, LLC) e 802.3 (CARRIER SENSE MULTIPLE ACCESS - COLLISION DETECT, CSMA/CD).

La figura mostra il legame tra queste due sigle e gli strati del modello; lo strato MAC in cui si realizza il CSMA/CD individua il MEDIA ACCESS CONTROL. Il mezzo trasmissivo è un cavo, coassiale o coppia simmetrica, sul quale sono collegati tutti i nodi della LAN, che si *contendono* il mezzo trasmissivo, in quanto vi può trasmettere solo un nodo per volta. Inoltre, tutti i nodi sono in ascolto sullo stesso mezzo per ricevere i pacchetti a loro destinati, riconoscibili per la presenza del proprio indirizzo Ethernet nel campo destinazione. Un pacchetto Ethernet può inoltre riportare un indirizzo di destinazione particolare, detto di *Broadcast*, che obbliga *tutti* i nodi presenti alla ricezione del pacchetto.



18.1.4.1 Address Resolution Protocol - ARP

Quando un pacchetto IP giunge ad un router, e l'indirizzo IP indica che il destinatario è connesso ad una delle LAN direttamente raggiungibili dal router⁴⁰, questo invia su quella LAN un pacchetto *broadcast*, su cui viaggia una richiesta ARP (ADDRESS RESOLUTION PROTOCOL), allo scopo di individuare l'indirizzo Ethernet del nodo a cui è assegnato l'indirizzo IP di destinazione del pacchetto arrivato al router. Se tale nodo è presente ed operativo, riconosce che la richiesta è diretta a lui, ed invia un pacchetto di risposta comunicando il proprio indirizzo Ethernet, che viene memorizzato dal router in una apposita tabella⁴¹.

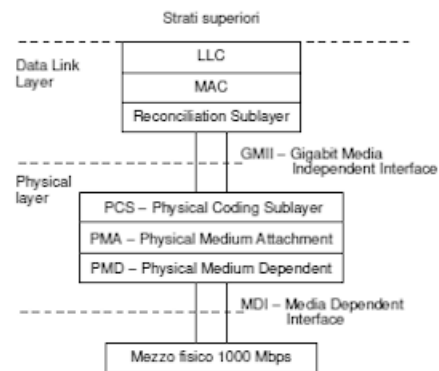
Operazioni simili sono svolte da ognuno dei nodi della LAN, ogni volta che debbano inviare un pacchetto ad un altro nodo direttamente connesso alla stessa rete locale. Se al contrario l'IP di destinazione non fa parte della stessa LAN, il pacchetto è inviato al *default gateway*.

18.1.5.6 Architettura

La figura a lato mostra la pila protocollare per Gigabit Ethernet. La GMII permette di usare lo strato MAC con qualunque strato fisico, ed opera sia in full-duplex che in half-duplex, alle velocità di 10, 100 e 1000 Mbps, mediante due percorsi dati (Tx e Rx) da 8 bit, più due segnali di strato per indicare presenza di portante e detezione di collisione, che sono mappati dal RS nelle primitive riconosciute dallo strato MAC preesistente.

Lo strato fisico è suddiviso in tre sottolivelli. Il PCS fornisce una interfaccia uniforme al RS per tutti i media. Provvede alla conversione 8B/10B tipica del *Fiber Channel*, che rappresenta gruppi di 8 bit mediante *code group* da 10 bit, alcuni dei quali rappresentano i simboli, ed altri sono codici di controllo, come quelli usati per la *carrier extension*. Il PCS genera inoltre le indicazioni sulla portante e sulla collisione, e gestisce la auto-negoziazione sulla velocità di trasmissione e sulla bidirezionalità del media.

Il PMA provvede alla conversione parallelo-serie e viceversa, mentre il PMD definisce l'MDI, ossia la segnalazione di strato fisico necessaria ai diversi media, così come il tipo di connettore.



ATM

La tecnica **ATM** è stata introdotta negli **anni '90**, quando Internet si stava affacciando alle comunicazioni di massa e richiedeva un supporto adeguato al **traffico che andava rapidamente intensificandosi**.

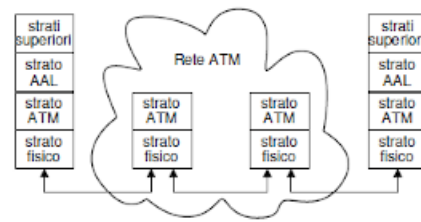
18.2 ATM

La sigla ATM sta per *Asynchronous Transfer Mode*, ed identifica una particolare rete progettata per trasportare indifferentemente traffico di diversa natura, sia di tipo dati che real-time⁵⁰, che per questo motivo è indicata anche come B-ISDN⁵¹. Il suo funzionamento si basa sul principio della *commutazione di cella* (CELL SWITCHING), dove per cella si intende un pacchetto di lunghezza fissa di 53 byte. I primi 5 byte delle celle contengono un identificativo di connessione, ed il loro instradamento avviene mediante dei circuiti virtuali. La commutazione delle celle tra i nodi di rete ha luogo in maniera particolarmente efficiente, e questa è una delle caratteristiche più rilevanti dell'ATM.

18.2.1 Architettura

La rete ATM viene indicata anche come una *Overlay Network*, in quanto operativamente si *sovrappone* ai livelli inferiori di una rete esterna.

Dal canto suo, ATM è strutturata sui tre strati funzionali di adattamento (AAL), di commutazione ATM, e fisico. Mentre i nodi ai bordi della rete devono realizzare tutti e tre gli strati, i nodi interni svolgono solo le funzioni attuate da quelli inferiori. La tabella 18.1 riporta le principali funzioni svolte dai tre strati, e pone in evidenza come in uno stesso strato siano identificabili diverse sotto-funzioni.



18.2.4 Classi di traffico e Qualità del Servizio (QoS)

Nella fase di *setup*, sono attuate delle verifiche dette *Connession Admission Control* (CAC) per assicurarsi che la nuova connessione non degradi le prestazioni di quelle già in corso, nel qual caso la chiamata è rifiutata. La sua accettazione determina invece la stipula tra utente e rete di un *Traffic Contract* a cui la sorgente si deve attenere. Nel corso della trasmissione, i nodi ATM verificano che le caratteristiche del traffico in transito nelle VCC siano conformi al rispettivo contratto, svolgendo un *Usage Parameter Control* (UPC) detto anche *policing*⁶². Prima di proseguire, forniamo però alcune definizioni.

Come anticipato, ATM si è sviluppata per trasportare diversi tipi di traffico, classificabili come segue, nei termini dei parametri indicati di seguito:

- *Constant Bit Rate* (CBR) identifica il traffico real-time come la voce⁶³ ed il video non
- *Variable Bit Rate* (VBR) può essere di tipo real time (es. video MPEG) oppure no, ed allora può tollerare variazioni di ritardo (CDV) ma non l'eccessiva perdita di dati (CLR);
- *Available Bit Rate* (ABR) tenta di sfruttare al meglio la banda disponibile. Il contratto prevede la fornitura di un MCR da parte della rete, e le sorgenti sono in grado di rispondere ad una indicazione di congestione, riducendo di conseguenza l'attività;
- *Unspecified Bit Rate* (UBR) condivide la banda rimanente con ABR, ma non gli è riconosciuto un MBR, né è previsto nessun controllo di congestione. Le celle in eccesso sono scartate. Idonea per trasmissioni insensibili a ritardi elevati, e che dispongono di meccanismi di controllo di flusso indipendenti⁶⁴.

Le classi di traffico sono descrivibili mediante i parametri

- *Peak Cell Rate* (PCR) applicabile a tutte le classi, ma è l'unico parametro per CBR;
- *Sustainable Cell Rate* (SCR) assieme ai tre seguenti, descrive le caratteristiche di VBR: velocità comprese tra SCR e PCR sono non-conformi, se di durata maggiore di MBS;
- *Minimum Cell Rate* (MCR) caratterizza la garanzia di banda offerta alla classe ABR;
- *Maximum Burst Size* (MBS) descrive la durata dei picchi di traffico per sorgenti VBR.

Il contratto di traffico, mentre impegna la sorgente a rispettare i parametri di traffico dichiarati, vincola la rete alla realizzazione di una *Quality of Service* (QoS), rappresentata dalle grandezze (tra le altre)

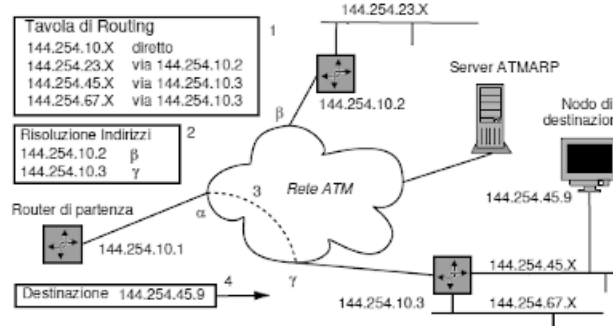
- *Cell Transfer Delay* (CTD) assieme alla seguente, è molto importante per la classe CBR;
- *Cell Delay Variation* (CDV) rappresenta la variabilità nella consegna delle celle, dannosa per le applicazioni real-time. La presenza di una CDV elevata può inoltre provocare fenomeni di momentanea congestione all'interno della rete, e può essere ridotta adottando degli *shaper*⁶⁵, che riducono la variabilità di ritardo a spese un aumento di CTD;
- *Cell Loss Ratio* (CLR) rappresenta il tasso di scarto di celle del collegamento.

Nel caso in cui il policing rilevi che una connessione viola le condizioni contrattuali⁶⁶, può intraprendere svariate azioni, e se può, non scarta immediatamente la cella, ma provvede comunque a segnalare l'anomalia, ponendo pari ad uno il bit *Cell Loss Priority* (CLP) dell'header. Ciò fa sì che la cella divenga *scartabile*⁶⁷ in caso di congestione in altri nodi. Un ulteriore campo dell'header, il *Payload Type* (PT), può infine ospitare una *segnalazione in avanti*, che manifesta

18.2.7 IP su ATM classico

Allo stesso tempo in cui si diffonde l'uso di ATM tra gli operatori di TLC, il TCP/IP emerge come lo standard comune per l'interconnessione tra elaboratori. Sebbene il TCP/IP si appoggi ad *Ethernet* in area locale, per i collegamenti a lunga distanza⁷¹ l'ATM presenta indubbi vantaggi come la disponibilità di banda su richiesta, la coesistenza con il traffico di tipo diverso, l'elevata efficienza della commutazione, e la possibilità di raggiungere diverse destinazioni. Una prima soluzione, subito scartata, fu quella nota come *peer model*, in cui i nodi ATM possiedono un indirizzo IP, ed usano i protocolli di routing IP. ATM risulta così *appaiata* alla rete IP, ma ciò complica la realizzazione dei nodi ATM, ed il metodo non si generalizza per protocolli diversi da IP.

L'alternativa seguita, detta *overlay model*, vede ATM come uno stato di collegamento su cui opera l'IP, che si comporta come se si trovasse su di una LAN. In particolare, solo i nodi di frontiera tra IP ed ATM prendono un doppio indirizzo, ed individuano una *Logical Subnet* (LIS) definita da uno stesso prefisso IP ed una stessa maschera di sottorete. Con riferimento alla figura che segue, quando il router di partenza vuole contattare il nodo di destinazione, trova (1) prima l'IP del router di destinazione, e quindi invia una richiesta ARP al server ATMARP presente nella LIS⁷², che risponde comunicando l'indirizzo γ , il quale è così risolto (2). A questo punto si può instaurare una VCC con B mediante la segnalazione ATM (3), ed effettuare la comunicazione (4). Una tale soluzione è nota come *vc multiplexing*, ed i dati sono incapsulati direttamente nella CPCS-PDU di AAL5. In ricezione, l'etichetta VPI/VCI è usata per consegnare il pacchetto al protocollo di strato superiore che ha realizzato la connessione ATM. D'altra parte, questa elaborazione deve avvenire a *diretto contatto* con AAL5, e ciò preclude la possibilità di interlavoro con nodi esterni alla rete ATM.



Nel caso in cui sia antieconomico creare un gran numero di vc, o se si dispone unicamente di un pvc⁷³, il pacchetto IP viene incapsulato in un header LLC IEEE 802.2 prima di essere consegnato all'AAL5. In tal modo, il router ricevente esamina l'header LLC del pacchetto ricevuto dal nodo ATM di *egress*, per consegnare il pacchetto al protocollo appropriato, realizzando così un *trasporto multiprotocollo* su ATM.

18.2.9 MPLS

Il *Multi Protocol Label Switching* (MPLS) è un metodo di realizzare una trasmissione a circuito virtuale su reti IP, la cui architettura è descritta nella RFC 3031 dell'IETF, e che verrà esposto meglio in una prossima edizione. Qui illustriamo i legami che MPLS presenta con ATM.

Lo sviluppo di MPLS ha origine dalle iniziative industriali tese a realizzare router internet economici di prestazioni elevate, e capaci di gestire la banda in modo appropriato. Lo IETF ha ricevuto il compito di armonizzare in una architettura standardizzata i diversi approcci, basati sul principio di inoltrare i pacchetti in base ad una etichetta (LABEL) impostata dal primo router della rete, proprio come avviene in ATM. Dato che erano già disponibili i dispositivi hardware per realizzare i nodi di switching ATM, i primi prototipi hanno semplicemente utilizzato tali switch sotto il diretto controllo di un router IP, collegato ad altri simili tramite la rete ATM. L'MPLS è tuttavia più generale, sia verso l'alto (è *multiprotocollo* in quanto si applica oltre che ad IP, a qualunque altro strato di rete) che verso il basso (funziona indifferentemente dall'implementazione dello strato di collegamento, sia ATM, *ethernet* od altro).

Conclusione

La prossima parte, la 7a, tratterà delle trasmissioni via radio e conterrà uno sguardo all'infrastruttura della rete nazionale, gestita da TIM.

Estratto da "<https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Clavicordo:tlc-big-6a-parte>"