

Capitolo 1:

Introduzione alle reti di telecomunicazione

1. Cos'è una rete di telecomunicazione

Una rete di telecomunicazione è definibile come l'insieme di dispositivi, canali trasmissivi e procedure mediante le quali due dispositivi d'utente, remoti ed attaccati alla rete, possono scambiarsi dell'informazione.

Il modo più semplice per consentire il colloquio tra due dispositivi d'utente (ad esempio due PC, due telefoni, ecc) è quello di collegarli mediante un canale trasmissivo diretto. In relazione a questo semplice sistema è possibile considerare un modello elementare di comunicazione come illustrato in Figura 1.

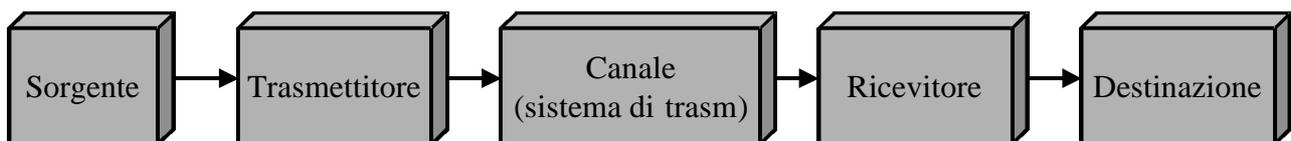


Figura 1: Modello di sistema di trasmissione

La **sorgente** rappresenta l'elemento che genera l'informazione che può assumere varie forme anche molto diverse tra loro come ad esempio: segnale vocale, testo di un messaggio di posta elettronica, immagine fissa o in movimento, ecc. L'informazione generata dalla sorgente, in generale, non può essere trasmessa sul mezzo trasmissivo nella forma nella quale viene generata; per questo il **trasmettitore** ha il compito di convertire l'informazione in segnali elettrici che possano essere inviati attraverso il **canale** trasmissivo. Il **ricevitore** riceve i segnali attraverso il canale e ricostruisce l'informazione che poi passa alla **destinazione**.

Anche questo semplice modello di colloquio tra sorgente e destinazione nasconde molte difficoltà di natura tecnica e realizzativa. Ad esempio, la **generazione del segnale** deve essere effettuata tenendo conto delle caratteristiche del mezzo trasmissivo e in modo tale che il ricevitore sia in grado di interpretarlo correttamente. La gran parte dei moderni sistemi di trasmissione usa segnali in forma numerica (o digitale); ciò significa che l'informazione viene dapprima trasformata in una sequenza di bit e che poi questa sequenza viene a sua volta trasformata in segnali elettrici (che come tali possono in un certo senso essere definiti analogici ovvero continui nel tempo). Sia la prima che la seconda trasformazione possono essere effettuate in modi diversi, e quindi è necessario che il ricevitore conosca le trasformazioni adottate dal trasmettitore per effettuare le procedure di trasformazione inversa. I vincoli imposti dalle caratteristiche del mezzo trasmissivo riguardano, tra l'altro, la velocità con la quale può essere trasmessa l'informazione. Nel caso di sistemi di trasmissione digitale si parla di **capacità del canale** di comunicazione espressa in bit al secondo (bit/s) che possono essere trasmessi.¹

Le procedure di ricostruzione effettuate dal ricevitore sono complicate dal fatto che, in generale, il segnale in uscita dal canale è diverso da quello trasmesso a causa di possibili effetti di distorsione del mezzo trasmissivo e di rumore/interferenza aggiunto dal mezzo stesso e dai dispositivi elettronici coinvolti. Per

¹ Spesso si usa anche il byte, pari ad otto bit, come unità di misura, ma in questi appunti si farà sempre riferimento ai bit. Si userà anche la notazione sintetica di Kbit per indicare 10^3 bit, M per indicare 10^6 bit e G per indicare 10^9 bit.

questo **errori** nella ricostruzione del segnale possono verificarsi. Per ovviare a questo problema esistono molti modi. Ad esempio è possibile aggiungere ai bit di informazione dei bit di ridondanza che consentano al ricevitore o di correggere gli errori o almeno di accorgersi che ci sono e richiedere la ritrasmissione dell'informazione errata.

Come detto il ritmo massimo con il quale i bit possono essere trasmessi dipende dalle caratteristiche del mezzo trasmissivo utilizzato. Il ritmo effettivo di trasmissione, però, anche se nominalmente pari alla velocità di canale, viene determinato da un orologio interno del trasmettitore. Il ricevitore per ricostruire correttamente questo segnale ha bisogno di conoscere in modo molto preciso il ritmo effettivo di trasmissione e per questo sono necessari dei metodi di **sincronismo** tra l'orologio del trasmettitore e quello del ricevitore.

Come è possibile intuire da quanto appena accennato, due sistemi che comunicano non devono solo scambiare l'informazione generata dalle sorgenti, ma anche dell'informazione di servizio che consenta alle due parti di conoscere, ad esempio, le procedure da usare per la trasmissione e la ricezione o quando effettuare una ritrasmissione. L'informazione di servizio, detta **segnalazione**, assume un'importanza sempre maggiore al crescere della complessità del sistema di telecomunicazione, come sarà chiaro in seguito.

Il modello semplice considerato si adatta al colloquio di due sistemi connessi tramite un canale diretto. Se l'insieme di sistemi da collegare è molto ampio, risulta naturalmente non pratico usare un canale diretto per ogni possibile coppia. Dunque, il problema è quello di consentire il colloquio tra un insieme di sistemi mediante una **rete di telecomunicazione**.

Anche il caso di collegamenti diretti tra ogni coppia di sistemi è una rete di telecomunicazione la cui **topologia** è rappresentabile mediante un grafo completo (topologia a maglia completa), dove i nodi rappresentano i sistemi e gli archi i collegamenti. Nel caso di N sistemi, il numero di collegamenti richiesto da questo approccio è pari a $N(N-1)$, come mostrato in Figura 2 per il caso di 5 nodi.

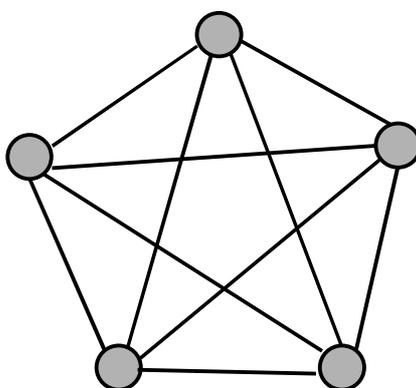


Figura 2: Topologia a maglia completa

Con una topologia a maglia completa, ogni collegamento è usato in modo esclusivo da una coppia di nodi. I collegamenti rappresentano le risorse della rete, e il loro grado di utilizzo un fattore importante per la determinazione dell'efficienza della rete stessa. Se ad esempio si assume che un nodo non usi più di un collegamento per volta si vede come al più una frazione di $1/(N-1)$ di risorse della rete può essere usata. Se poi si assume che un nodo possa non essere coinvolto in scambio di informazioni con altri nodi per intervalli di tempo anche lunghi, si intuisce come l'efficienza di una soluzione a maglia completa sia spesso molto bassa.

Per aumentare l'efficienza è necessario che i sistemi che vogliono scambiare informazioni condividano le risorse della rete, ovvero i canali trasmissivi.

Un'evoluzione del modello di Figura 1 è rappresentata dal modello di Figura 3 dove il canale diretto è sostituito da una rete di telecomunicazione che fornisce i canali di comunicazione *su richiesta*. Esempio

tipico è quello della rete telefonica dove la rete mette a disposizione di una coppia di utenti un collegamento di capacità fissa su richiesta e per la sola durata della conversazione.

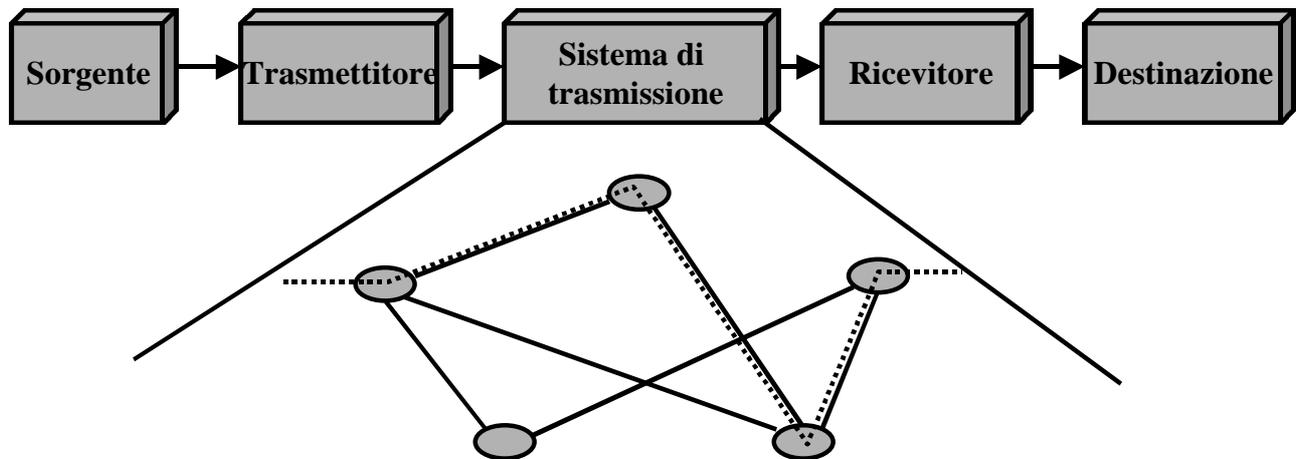


Figura 3: Modello di collegamento mediante rete a circuito

Ogni arco è composto da un certo numero di canali utilizzabili per connettere sorgente e destinazione. Quando è necessario il trasferimento di informazione tra due sistemi, una richiesta per un viene rivolta alla rete. Tale richiesta viene effettuata mediante lo scambio di informazione di servizio tra utente e rete, ovvero mediante della **segnalazione utente-rete**. Ricevuta la richiesta, la rete deve trovare un percorso tra i due sistemi (**instradamento**) e dedicare un canale per ogni arco del percorso al collegamento. Per effettuare queste operazioni i nodi della rete devono scambiare informazione di servizio (**segnalazione di rete**). All'interno di ogni nodo di rete attraversato dal percorso deve essere messo in collegamento un canale di ingresso con un canale d'uscita effettuando le operazioni dette di **commutazione**. Se nessun canale è disponibile tra sorgente e destinazione la richiesta viene rifiutata. Per lo scambio di informazioni tra due sistemi, dunque, è necessario prima effettuare le operazioni che consentono di creare un canale di trasmissione (fase di **instaurazione del collegamento**) e poi effettuare lo scambio di informazioni vero e proprio sul canale (circuito) creato (fase di **trasferimento dati**). Le reti, come quella telefonica, che adottano queste procedure per connettere due sistemi vengono dette a **commutazione di circuito**.

In una rete i sistemi che scambiano informazione (sistemi finali o end-system) e i nodi di rete (nodi di commutazione o switching node) svolgono funzioni differenti, ma devono collaborare e scambiare informazione di servizio affinché la rete svolga correttamente il suo compito. I canali messi a disposizione per i collegamenti possono consentire lo scambio in un solo verso (canali half-duplex) o in entrambe i versi (canali full-duplex); in quest'ultimo caso i due sistemi finali svolgono sia il compito di sorgente che di destinatario di informazione.

Le reti a commutazione di circuito non sono l'unica soluzione al problema della condivisione delle risorse trasmissive. Se durante un collegamento la sorgente rimane inattiva per degli intervalli di tempo, le risorse del collegamento rimangono inutilizzate (si pensi ad esempio al collegamento agli Internet Access Provider mediante la rete telefonica). Un approccio differente viene seguito dalle reti a **commutazione di pacchetto** nelle quali l'informazione da trasferire viene divisa in segmenti a cui viene aggiunta dell'informazione di servizio (header) contenente almeno l'indicazione del destinatario. I pacchetti (informazione più header) sono consegnati alla rete che, autonomamente, si preoccupa di trasferirli di nodo in nodo attraverso i canali disponibili fino alla destinazione (Figura 4). Il pacchetto occupa le risorse trasmissive tra due nodi della rete per il solo tempo necessario alla sua trasmissione e nel suo percorso tra sorgente e destinazione occupa un solo canale per volta. Pacchetti relativi a coppie sorgente-destinazione differenti possono condividere le risorse rete in modo dinamico. Se all'arrivo di un pacchetto in un nodo il o i canali d'uscita sono occupati in trasmissioni di altri pacchetti, il pacchetto viene temporaneamente memorizzato nel nodo in attesa che un canale si liberi. Nei nodi, dunque, sono presenti code (buffer) di pacchetti in attesa di essere trasmessi.

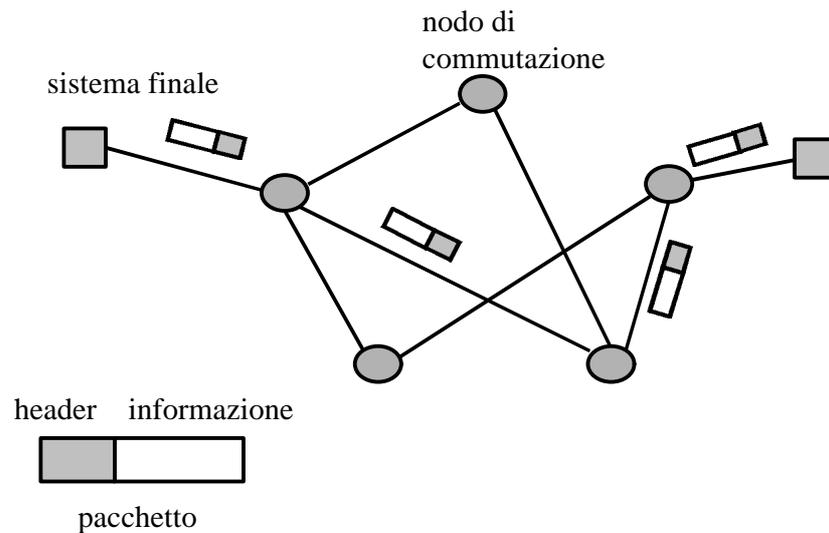


Figura 4: rete a commutazione di pacchetto

La tecnica della commutazione di pacchetto è molto diffusa nell'ambito delle reti dedicate al trasferimento di dati e molto meno nelle reti dedicate al trasporto della voce, anche se nei prossimi anni è prevedibile un netto cambio di tendenza. Le prime reti dati a essere diffuse su larga scala sono state le **reti locali (Local Area Network - LAN)** ovvero reti per lo scambio di informazioni tra calcolatori di una stessa azienda o università spesso posti nello stesso edificio. La classificazione delle reti sulla base dell'area geografica coperta comprende anche le **reti metropolitane (Metropolitan Area Network – MAN)** e le **reti per lunga distanza (Wide Area Network – WAN)**.

Nei semplici modelli fin qui considerati si è fatto riferimento a canali trasmissivi in grado di collegare due sistemi. Tali canali sono detti canali **punto-punto**. Esistono, però, anche altri tipi di canali in grado di collegare più sistemi contemporaneamente detti canali **punto-multipunto** di particolare importanza per le reti locali.

Le problematiche sopra considerate costituiscono un saggio di quelle che è necessario affrontare nello studio delle reti di telecomunicazione. In relazione agli argomenti trattati nel corso e in queste dispense occorre sottolineare che le problematiche legate alla conversione dell'informazione in segnali e al trasferimento dei segnali attraverso un singolo mezzo trasmissivo sono trattate nella parte di Comunicazioni Elettriche. In questa parte del corso, invece, si suppone di avere dei modi per trasferire i segnali attraverso i canali trasmissivi e si sviluppano le problematiche legate alle funzionalità aggiuntive necessarie al colloquio tra i dispositivi d'utente come: organizzazione dell'informazione in unità informative, instaurazione di un percorso nella rete, procedure di colloquio tra dispositivi, procedure per l'uso contemporaneo degli stessi canali trasmissivi da parte di più flussi informativi, ecc.

2. Modelli funzionali

Nella descrizione delle funzionalità di base di una rete di telecomunicazione si è fatto riferimento al colloquio tra sistemi finali, ma anche al colloquio tra utente e rete e tra nodi della rete. Così come nel colloquio tra due persone mediante l'ausilio di due interpreti, occorre definire a che "livello" avviene il colloquio e lo scambio di informazioni.

In questo paragrafo vengono definiti dei modelli funzionali di colloquio tra sistemi che consentono di affrontare le problematiche associate al trasferimento di informazione in modo formale.

2.1 Il servizio di comunicazione

Consideriamo un sistema di comunicazione dell'informazione fra due o più *entità*, appartenenti a sistemi fisici diversi chiamati *nodi*, in grado di permettere lo scambio di messaggi (*colloquio*). Il sistema di comunicazione è modellabile come un fornitore del servizio di trasporto dell'informazione (servizio di comunicazione in senso stretto).

Il servizio di comunicazione può essere descritto in termini di "chiamate" di servizio che prendono il nome di *primitive di servizio* (Figura 5). Le primitive definiscono i servizi resi dal sistema di comunicazione alle due entità estreme A e B e sono di quattro tipi per ogni servizio richiesto:

- la *Richiesta* di A che richiede il servizio;
- la *Indicazione* verso B, che indica all'entità B l'avvenuta richiesta di A;
- la *Risposta* di B, che di solito fa seguito alla Indicazione;
- la *Conferma* verso A, che indica all'entità A l'avvenuta risposta di B e conclude esecuzione del servizio.

Le primitive di servizio sono poi accompagnate dall'indicazione dei parametri utili alla specificazione del servizio. Per esempio se si invoca il servizio di trasferimento dell'informazione il parametro principale è l'informazione da trasferire che si allega alla primitiva. Altri parametri sono ad esempio l'indicazione del destinatario (indirizzo), il tipo di servizio di trasferimento richiesto, ecc.

Le modalità di comunicazione fra entità si dividono in due grandi classi, la modalità a *connessione* (connection oriented) e la modalità *senza connessione* (connectionless).

La modalità di comunicazione a connessione prevede 3 fasi principali:

- instaurazione della connessione;
- trasferimento dell'informazione;
- rilascio della connessione.

Durante la fase di instaurazione della connessione le due entità stabiliscono un contatto e si predispongono al trasferimento dell'informazione che avviene nella fase successiva e che finisce con la fase di rilascio. Tipico esempio di servizio di comunicazione a connessione è la chiamata telefonica.

La modalità di comunicazione senza connessione prevede una sola fase al posto delle tre precedentemente illustrate, in cui l'informazione vera e propria è trasferita insieme alle informazioni ausiliarie atte a portare a termine il trasferimento. Tipico esempio di questo servizio è il servizio postale, in cui la busta reca l'informazione di servizio.

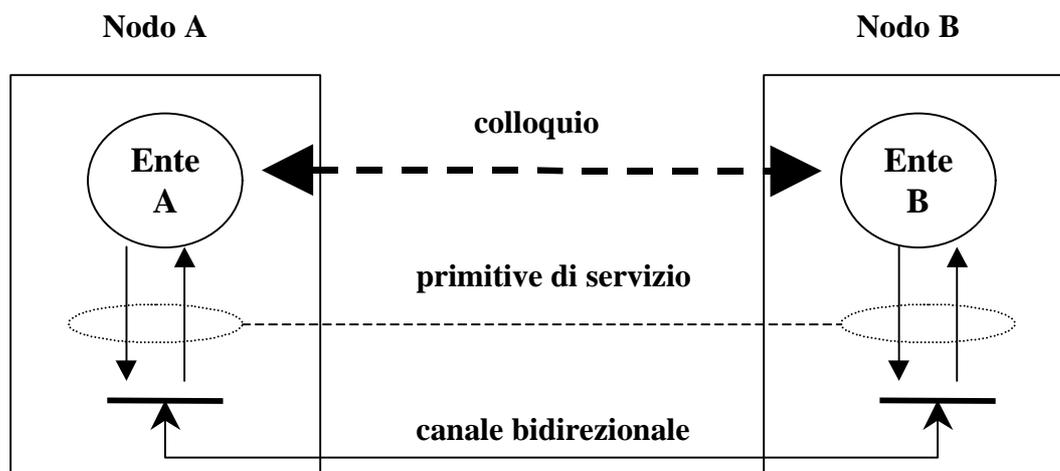


Figura 5: Entità colloquianti tramite primitive di servizio

2.2 I protocolli di comunicazione

L'insieme delle entità che colloquiano in una rete utilizzando delle primitive di servizio possono a loro volta offrire un servizio di comunicazione ad entità terze, dette entità di *livello superiore*, situate negli stessi nodi (Figura 6). In questo modo le entità di livello inferiore fanno da tramite alla comunicazione fra entità di livello superiore.

La cosa ha senso quando il servizio reso alle entità di livello superiore è diverso da quello base, ossia quando è semplificato (si pensi per esempio al vecchio servizio di telegrafia in cui l'addetto, entità base, fa parlare gli utenti inviando e ricevendo segnali morse, ma facendo colloquiare gli utenti in forma alfabetica scritta), oppure arricchito (ad esempio lo strato superiore potrebbe aggiungere la protezione contro l'errore introducendo, nell'informazione da trasferire una opportuna codifica).

Anche il servizio reso alle entità di livello superiore viene descritto da primitive di servizio. L'entità di livello inferiore ha dunque lo scopo di trasformare le primitive e i servizi di comunicazione che essa vede direttamente, in primitive e i servizi di comunicazione offerti alle entità superiori.

Le entità di pari livello colloquiano tra loro usando i servizi offerti dal livello inferiore. Lo scopo del colloquio è quello di scambiare le informazioni necessarie a fornire i servizi al livello superiore. L'insieme delle regole che sovrintendono al colloquio tra entità dello stesso livello è detto *protocollo di comunicazione*. L'insieme dei protocolli di uno stesso livello utilizzano unità di trasferimento dati chiamate Packet Data Units (PDU) o (trame del protocollo) che sono scambiate usando i servizi di trasporto dei livelli inferiori.

Le PDU possono contenere sia informazione vera e propria ricevuta dai livelli superiori che informazioni di servizio aggiunte dal protocollo stesso. Le PDU di controllo contengono solo informazione di servizio, mentre quelle dati sono di solito composte da una parte (header) contenente informazione di servizio e una parte (dati) contenente l'informazione vera e propria. Ad esempio nel caso di colloquio connectionless la PDU può essere composta da un header in cui è contenuto tra l'altro un identificativo del destinatario e da un campo dati in cui è contenuta l'informazione da trasferire.

Se il protocollo è simmetrico, nel senso che offre le stesse possibilità e diritti a entrambe le entità colloquianti allora le entità si chiamano *paritetiche* e il protocollo è un protocollo di comunicazione fra entità paritetiche o *peer-to-peer*, altrimenti viene detto di tipo *master-slave* o *client-server*.

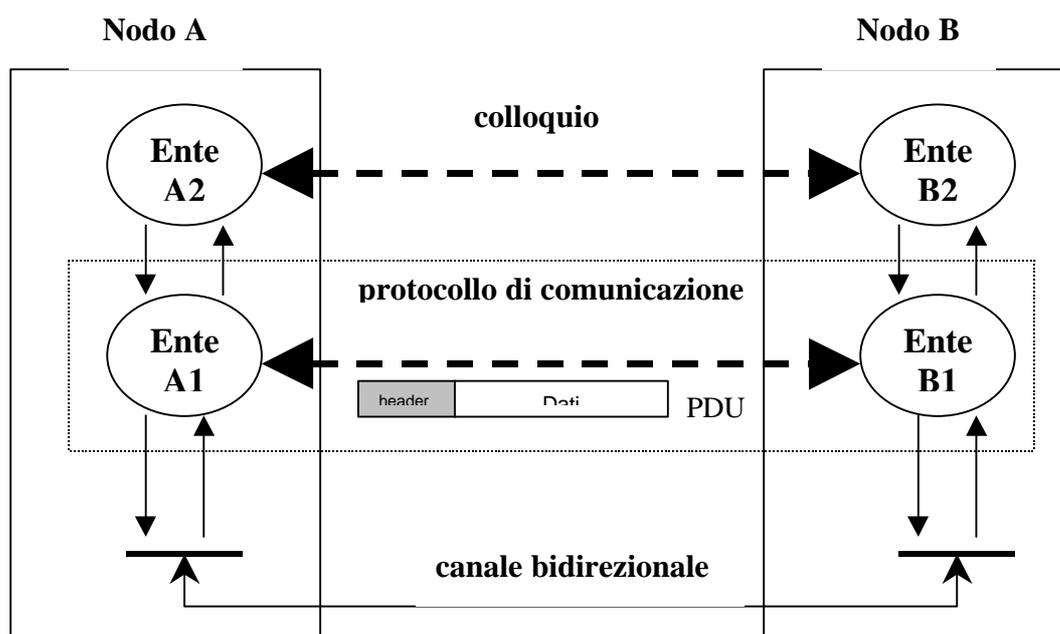


Figura 6: Interazione tra servizi e protocollo di comunicazione

2.3 L'architettura a strati

La struttura di servizi di comunicazione complessi può essere utilmente articolata in livelli o strati: partendo da un servizio di comunicazione minimo a livello più basso, ogni livello arricchisce i servizi offerti sino ad arrivare a quelli offerti alle applicazioni d'utente. L'architettura che ne deriva è detta architettura di protocolli a strati (*protocol stack*).

Le PDU ai vari livelli possono essere molto diverse, coincidendo con le informazioni d'utente al livello più alto e col singolo bit al livello più basso (livello fisico).

Ciascuno dei servizi offerti da uno strato viene rappresentato logicamente con una porta di accesso al servizio che è chiamata SAP (Service Access Point). L'utilizzo del servizio di trasferimento dell'informazione viene svolto trasferendo attraverso i SAP le PDU di livello N+1 che, viste come unità di servizio ricevute dal livello N prendono il nome di N-SDU (Service Data Unit).

A sua volta la N-SDU può venire integrata con l'informazione di controllo del protocollo di livello N, indicata N-PCI (Protocol Control Information), in modo da formare la PDU di livello N. Tale N-PDU è la base del colloquio dei protocolli di livello N delle entità in rete e, in generale, è trasferita tramite un servizio di trasferimento di livello più basso.

Le relazioni tra PDU, SDU e PCI dei livelli N+1 ed N sono esemplificate in figura 3. Si noti che in uno stesso nodo e livello possono esserci diversi protocolli, e relativi SAP, che offrono servizi di natura diversa.

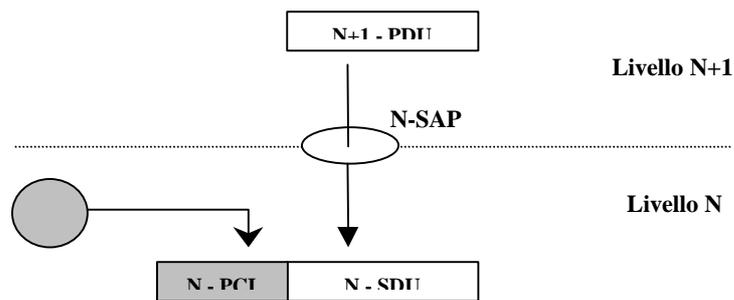


Figura 7: Relazioni tra PDU, SDU e PCI.

In una architettura completa, dunque, le unità informative vengono trasferite attraverso tutti i livelli sino a giungere ad un livello fisico direttamente in colloquio con un canale di trasmissione. Ciascuno strato, prima di trasferire l'unità informativa aggiunge le necessarie informazioni di controllo (header) del protocollo relativo allo strato. In Figura 8 è esemplificato il caso di una architettura a 5 strati.

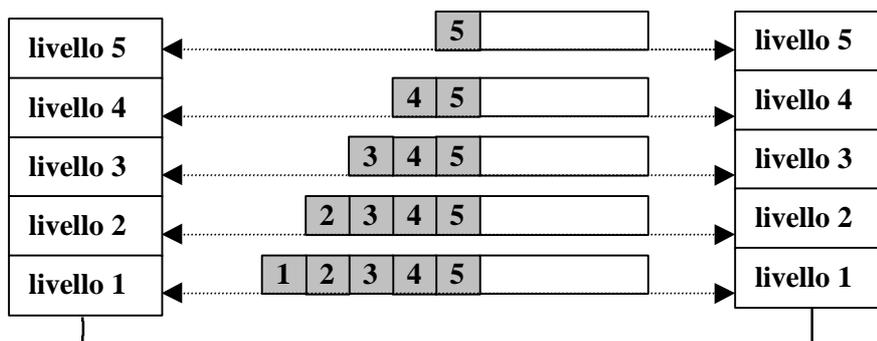


Figura 8: Esempio di architettura a strati formata da 5 livelli.

Le funzioni svolte da uno strato possono essere divise in funzioni di adattamento dei servizi dello strato inferiore a quelli da offrire allo strato superiore e in funzioni di arricchimento del servizio stesso.

Fra le funzioni di adattamento che uno strato esegue verso i servizi resi dallo strato sottostante ricordiamo la funzione di *segmentazione*, che consiste nel suddividere la SDU proveniente dal livello N+1 in frammenti, qualora l'intera SDU abbia lunghezza che eccede la massima ammessa dal protocollo di livello N (Figura 9). Naturalmente, al nodo destinatario a tale funzione corrisponderà la funzione di riassetto. Dualmente può essere offerta la funzione di aggregazione qualora risulti conveniente aggregare più SDU provenienti dallo stesso SAP in un'unica PDU.

Un'altra funzione possibile è la *multiplazione*, in cui le SDU provenienti da SAP diversi sono convogliate in un unico SAP sottostante. Dualmente, l'entità di comunicazione potrebbe inviare le sue PDU su canali paralleli utilizzando diversi SAP in parallelo dello strato sottostante implementando la funzione di *multiplazione inversa* (Figura 10).

Si noti che in uno stesso nodo possono coesistere diverse strutture a strati articolate in modo diverso ed intercomunicanti. Caso tipico è quello del servizio di gestione e supervisione di tutti i servizi di comunicazione offerti ai vari livelli.

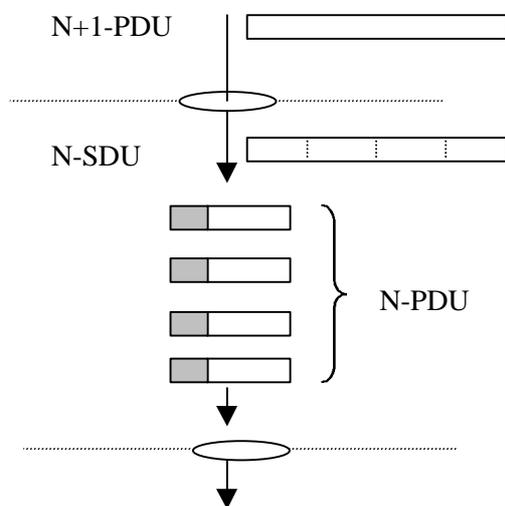


Figura 9: Funzione di segmentazione

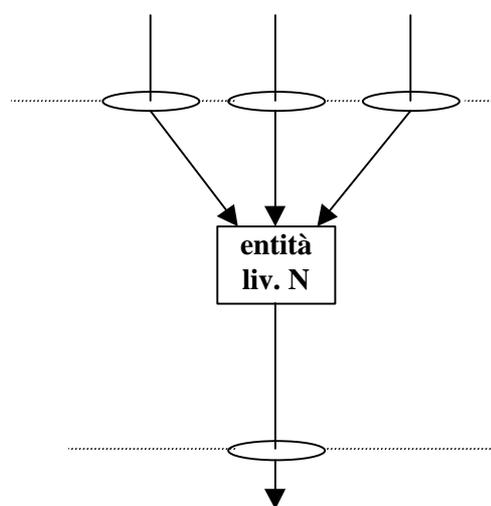


Figura 10: Funzione di multiplazione

2.4 Le funzionalità di rete

In precedenza si è già usato il termine rete ad indicare in modo generale un sistema di telecomunicazione con più sistemi colloquanti. In questo paragrafo si farà riferimento alle funzioni di rete che sono implementate in un insieme di nodi (in generale con più di due elementi) quando è possibile il colloquio tra le entità di un certo livello. In altre parole, le funzionalità di rete sono inerenti al colloquio mediante protocollo di un insieme di entità.

Dato che il colloquio avviene in generale tra più di due entità, la prima funzione di rete è sicuramente quella dell'indirizzamento che consente di identificare una tra le entità dell'insieme con la quale colloquiare. Quando un livello offre il servizio di rete allo strato superiore indica come parametro del servizio l'indirizzo di destinazione che dunque viene passato insieme alla PDU da trasferire. Tale indirizzo indica logicamente il SAP tra i due livelli corrispondenti nel sistema di destinazione. L'uso dell'indirizzo come parametro presuppone l'esistenza di un formato e di un piano di indirizzamento. Di solito, oltre agli indirizzi singoli sono utilizzati indirizzi *broadcast* che indicano in modo logico l'insieme di tutti gli indirizzi o indirizzi *multicast* che indicano sottoinsiemi di indirizzi.

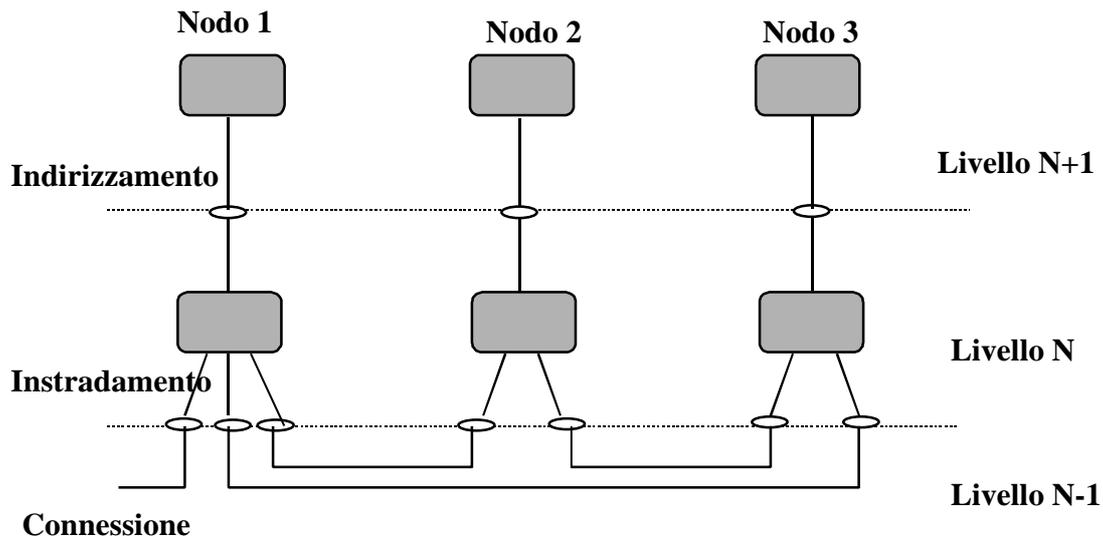


Figura 11: Costruzione della funzione di rete sopra un servizio di connessioni punto-punto

La funzione di rete può essere, di solito, costruita nel livello superiore a quello che offre un servizio di collegamenti punto-punto o broadcast. In Figura 11 è esemplificato il primo caso. A livello N , a ciascun SAP verso il livello inferiore corrisponde un collegamento punto-punto verso un altro nodo della rete, quindi la scelta del SAP comporta la scelta della entità di livello N con cui si scambia informazione. Il livello N può offrire un servizi di rete a livello superiore usando degli indirizzi: ogni volta che viene passata una PDU al livello N viene anche passato come parametro un indirizzo di destinazione. Il livello N che riceve la PDU e l'indirizzo decide su quale o quali SAP inoltrare l'informazione svolgendo la funzione di **instradamento**. L'entità di livello N che riceve la N-PDU la passa a livello superiore se l'indirizzo di destinazione corrisponde a uno dei suoi SAP verso il livello $N+1$, o altrimenti procede ad un nuovo instradamento. Quindi l'unità informativa può passare attraverso molti nodi intermedi prima di giungere a destinazione (Figura 12). Alcuni nodi intermedi possono non avere i livelli superiori e svolgere solo la funzione di instradamento. In realtà, in questo caso occorre distinguere tra due funzioni svolte dal nodo quella di **instradamento** che consiste nello scegliere il SAP di uscita per la PDU, e quella di **commutazione** che consiste nel trasferire la PDU dal SAP di ingresso a quello d'uscita.

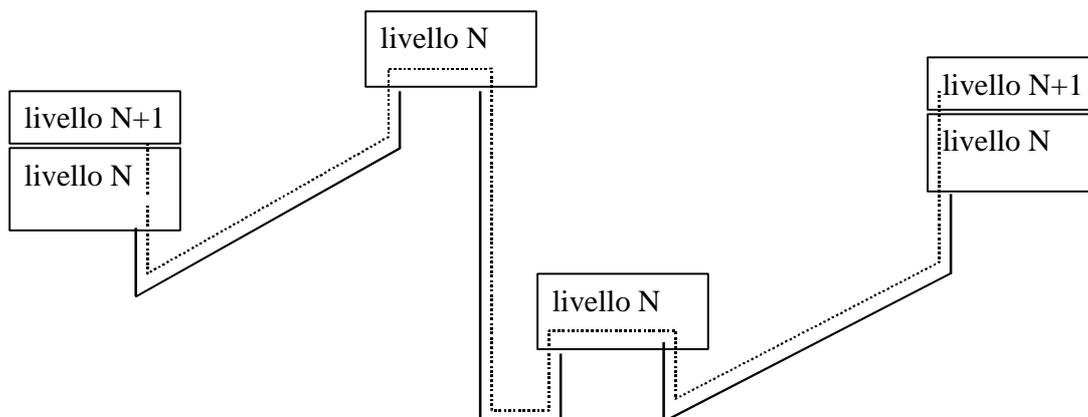


Figura 12: Instradamento verso la destinazione

Il servizio richiesto dal livello superiore può anche essere un servizio broadcast. In tal caso il livello N può, ad esempio, implementarlo inviando la PDU su tutti i SAP (collegamenti punto-punto) a sua disposizione.

La funzione di instradamento richiede la conoscenza del SAP da utilizzare per ogni possibile indirizzo di destinazione (tabella di instradamento). La tabella di instradamento può essere costruita mediante lo scambio di informazioni (solo informazioni di servizio) tra nodi vicini (direttamente connessi dai collegamenti punto-punto), ovvero tramite un **protocollo di instradamento**.

Facendo, dunque, riferimento a nodi intermedi (che implementano la sola funzione di instradamento) e nodi finali (che usano il servizio di rete di livello N), è possibile osservare come una stessa rete possa essere rappresentata in modo diverso a seconda che la si consideri a livello N o a livello $N+1$ (Figura 13).

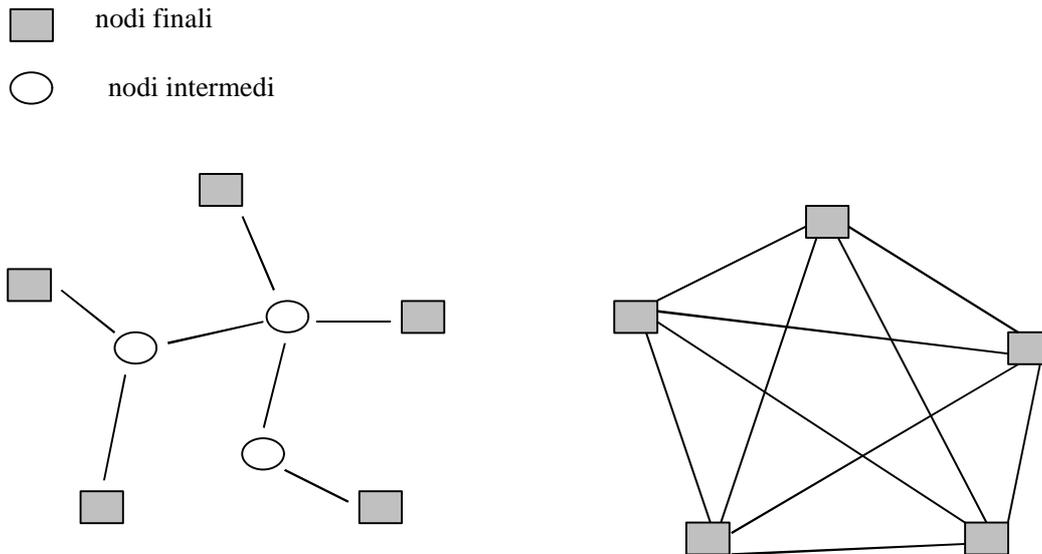


Figura 13: La rete a livello N e a livello $N+1$

Il servizio di rete può essere offerto anche usando dei collegamenti broadcast (è questo il caso tipico delle LAN). In questo caso il livello N riceve tutte le PDU grazie alla caratteristica broadcast dei collegamenti e inoltra a livelli superiori solo quelle che corrispondono al suo indirizzo e scarta tutte le altre (Figura 14).

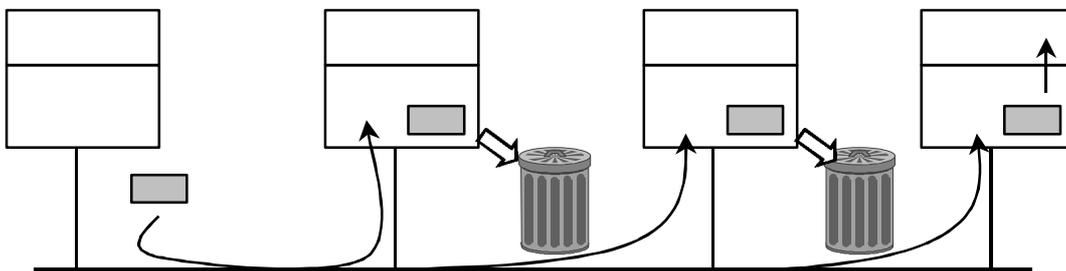


Figura 14: Servizio di rete sopra collegamenti broadcast

Le funzioni di commutazione e instradamento possono essere svolte con tecniche diverse, come accennato in precedenza. In particolare distinguiamo la tecnica di commutazione di circuito e quella di pacchetto.

Nella tecnica a commutazione di circuito i nodi di commutazione hanno il compito di collegare in modo stabile un SAP di ingresso con un SAP d'uscita. Naturalmente, la funzione di instradamento che decide dell'associazione tra SAP di ingresso e SAP di uscita viene svolta prima della commutazione nella fase detta di instaurazione della connessione durante la quale è richiesto lo scambio di segnalazione tra i nodi. A titolo

esemplificativo si può immaginare che la fase di segnalazione richieda lo scambio di due messaggi, quello di richiesta e quello di risposta. Una volta collegati i SAP di ingresso e di uscita, l'informazione può attraversare senza ritardi i nodi intermedi. In Figura 15 è mostrato un possibile diagramma temporale di una connessione effettuata con commutazione di circuito (si noti che le linee che indicano il trasferimento dell'informazione tra i nodi sono oblique per tenere conto del tempo di propagazione).

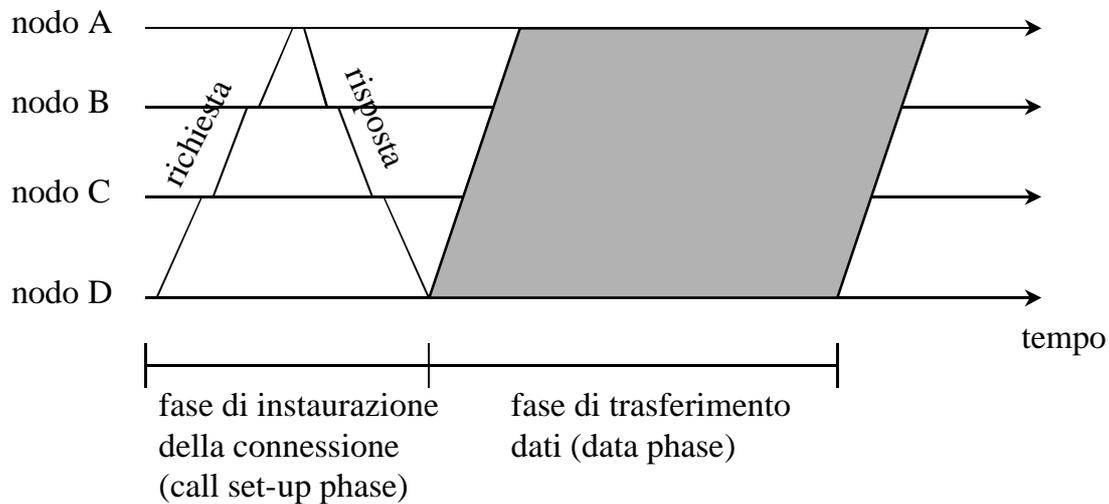


Figura 15: commutazione di circuito

La tecnica a circuito è l'unica possibile quando la commutazione avviene direttamente sul flusso di informazione (in bit). In questo caso ad essere commutato è il singolo bit (o byte) che viene trasferito tra ingresso ed uscita sulla base del collegamento stabilito durante la fase instaurazione della connessione. Se, invece, l'informazione è organizzata in unità informative più lunghe è possibile aggiungere l'informazione di segnalazione direttamente all'informazione e formare dei pacchetti che possono essere passati direttamente da un nodo a quello successivo. L'instradamento viene effettuato sulla base dell'informazione di segnalazione aggiunta.

La commutazione di pacchetto può essere implementata in due modalità distinte: modalità **datagram** e modalità a **circuito virtuale**.

Nelle reti a pacchetto di tipo datagram, ogni pacchetto viene considerato come entità autonoma e viene instradato da nodo in nodo sulla base dell'indirizzo di destinazione contenuto nell'header. L'analogia con la modalità di funzionamento del servizio postale è fin troppo ovvia. Pacchetti (detti in questo caso datagrammi) dello stesso flusso informativo possono seguire strade diverse verso la destinazione perché la rete li tratta come entità autonome e non come parti di un flusso. I nodi conservano una tabella di instradamento, costruita mediante un protocollo di instradamento, nella quale per ogni possibile destinazione è indicata almeno una possibile uscita. Tra un pacchetto e l'altro di uno stesso flusso può cambiare la tabella degli instradamenti, o il nodo può utilizzare uscite differenti tra quelle possibili.

Nelle reti a circuito virtuale i nodi identificano i flussi di pacchetti mediante un identificativo di circuito virtuale contenuto nell'header e instradano i pacchetti sulla base di una tabella di instradamento che contiene le relazioni ingresso uscita per i circuiti virtuali attivi. Come conseguenza tutti i pacchetti di uno stesso flusso seguono lo stesso cammino nella rete. Prima del trasferimento dei pacchetti è necessario effettuare una fase di instaurazione del circuito virtuale simile a quello della commutazione di circuito; l'unica differenza è che in questo caso non viene effettuata un'associazione "fisica" tra SAP di ingresso e SAP di uscita, ma solo un'associazione logica mediante la tabella di corrispondenza.

L'identificativo di circuito virtuale è assegnato durante la fase d'instaurazione e può avere significato globale in tutta la rete o molto più spesso significato locale tra due nodi. Nel primo caso il pacchetto conserva il proprio identificativo durante l'attraversamento della rete e le tabelle di instradamento dei nodi contengono solo la corrispondenza ingresso uscita per ogni identificativo attivo. Il problema, in questo caso, nasce dalla necessità di assegnare gli identificativi in modo univoco nella rete durante la fase di

instaurazione del circuito. Nel caso, invece, di identificativi con significato locale, gli identificativi hanno significato solo in relazione ad un canale di collegamento tra due nodi. In questo caso, quindi, il pacchetto cambia identificativo nel passaggio da un canale ad un altro e la tabella di instradamento contiene, oltre alla corrispondenza tra ingresso e uscita per ogni identificativo di circuito virtuale dei canali di ingresso, anche l'identificativo da usare nel canale di uscita e che deve essere scritto nel pacchetto dal nodo stesso. Il vantaggio in questo caso è dato dalla possibilità per i nodi di assegnare gli identificativi in modo autonomo. Inoltre, appare evidente come sia possibile, in linea di principio, utilizzare identificativi più corti che nel caso precedente. In Figura 16 è illustrato un nodo di una rete a circuito virtuale che effettua la commutazione e il cambio di identificativo di circuito.

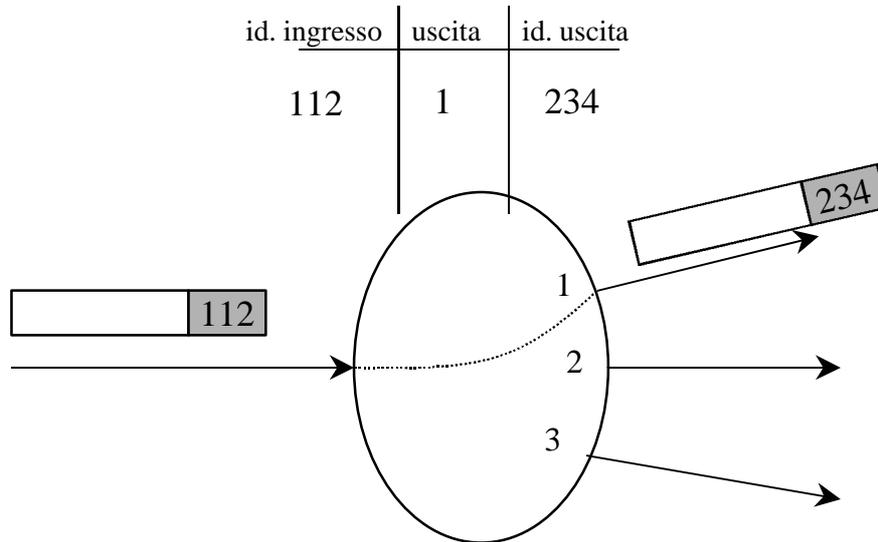


Figura 16: instradamento per circuito virtuale

Nelle reti a commutazione di pacchetto i pacchetti attraversano la rete passando di nodo in nodo. Il nodo che riceve un pacchetto da un canale in ingresso lo memorizza temporaneamente, analizza l'header per effettuare l'instradamento e poi lo manda verso il SAP di uscita. Se il canale d'uscita è occupato da una trasmissione di un altro pacchetto il nuovo pacchetto deve essere messo in attesa in una coda (buffer) d'uscita. Il tempo di attesa nelle code di uscita dai nodi rappresenta un importante contributo al ritardo di attraversamento di una rete in cui sia presente un traffico elevato. Se il numero di pacchetti in attesa cresce troppo in quanto il ritmo di arrivo è superiore alla capacità di smaltimento del canale, il buffer può riempirsi e iniziare a perdere pacchetti per mancanza di spazio di memoria. Lo studio dei ritardi ed altri aspetti prestazionali delle reti a pacchetto è affrontabile con strumenti di *Teoria delle Code*, o nei casi più complessi mediante simulazione al calcolatore.

In Figura 17 è mostrato un diagramma temporale di un flusso di pacchetti in un rete con poco traffico nella quale siano trascurabili i tempi di accodamento. I tempi coinvolti nel trasferimento di un pacchetto su un canale sono il tempo di trasmissione, quello di propagazione e quello di elaborazione. Tali contributi al *ritardo di attraversamento* sono contributi costanti con il traffico, mentre il tempo di accodamento dipende dal volume di traffico. Il tempo di trasmissione è pari a:

$$T_t = \frac{L}{C}$$

dove L è la lunghezza del pacchetto (in bit) e C la capacità del canale (in bit/s). Il tempo di propagazione è pari a:

$$T_p = \frac{l}{V}$$

dove l è la lunghezza fisica del canale (in m) e V è la velocità della luce nel mezzo (in m/s). Il ritardo di elaborazione è il tempo necessario a leggere l'header e a decidere l'instradamento e dipende dalla velocità di elaborazione del nodo; in generale, tale ritardo è trascurabile rispetto agli altri ritardi.

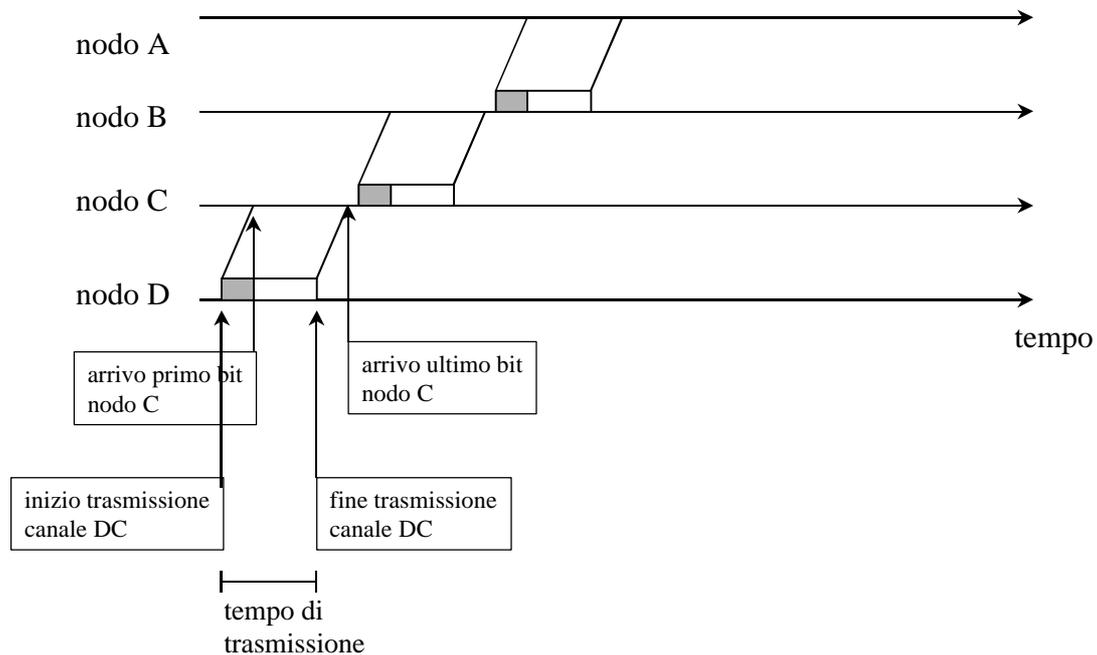


Figura 17: commutazione di pacchetto

3. L'architettura a strati OSI

L'evoluzione storica delle reti ha portato alla definizione di diverse architetture a strati, per lo più proprietarie, in cui il numero e le funzioni dei diversi strati non sempre coincidono. Da qui lo sforzo delle organizzazioni di standardizzazione di fornire un unico modello di riferimento sia per i livelli sia per i servizi. L'ISO (International Standards Organization) ha completato nel 1984 un modello di riferimento noto come *architettura OSI* (Open System Interconnection). Questo è un modello a strati dell'architettura di rete generale per tecniche e principi cui deve soddisfare una rete "aperta", ossia in grado di far comunicare sistemi (nodi) di diversi costruttori.

Benché il riferimento OSI sia oggi universalmente accettato nei principi, continuano a coesistere diverse architetture, vuoi perché queste architetture sono molto diffuse nel mondo (si pensi all'architettura IP dell'Internet che sarà descritta nei capitoli successivi) vuoi perché l'evoluzione ha mostrato che non sempre i nuovi problemi trovano soluzione ottimale nell'architettura OSI.

L'architettura OSI originale prevede sette strati o livelli nei quali sono svolte le funzioni che saranno descritte qui di seguito. Va notato però che l'evoluzione della tecnologia e delle funzioni non sempre ha reso univoca l'identificazione degli strati. Inoltre, nuove funzionalità hanno suggerito di arricchire il numero di strati introducendo dei *sottostrati*.

3.1 Il Livello Fisico

Il livello fisico ha lo scopo di provvedere un mezzo di trasferimento da un nodo all'altro dell'unità informativa minima, il bit. In generale, fanno parte del mezzo tutti quegli apparati atti a trasformare il flusso di bits in opportuni segnali da inviare sul mezzo trasmissivo. Questi apparati comprendono i modulatori,

trasmettitori, multiplatori ecc., mentre i mezzi trasmissivi sono i più disparati, quali linee bifilari, cavi coassiali, ponti radio, fibre ottiche.

Come precedentemente accennato, un servizio di trasferimento di bit a livello fisico può anche essere offerto da una rete, e in particolare dalla rete telefonica, in cui il sistema di trasferimento è costituito da un circuito (fisico) che può essere assegnato su base permanente (PC o Permanent Circuit) o commutato, ossia assegnato su domanda (SC o Switched Circuit). Come vedremo, la segnalazione di supporto alla rete telefonica interagisce con la rete, ma può essere considerata una rete a se stante con il proprio modello a strati.

3.2 Il Livello Data-Link

Nel livello Data Link (DL) trovano posto, storicamente, le funzioni che sovrintendono al trasferimento sul link di unità logiche di bit e al loro controllo.

Per identificare in modo logico un gruppo di bit/bytes occorre che questi siano raggruppati, attraverso delimitatori fisici, in una **trama**. Alcuni dei bit della trama costituiscono l'*header* della trama e permettono l'identificazione logica attraverso varie etichette (numerazione, indirizzo, ecc.).

Alcuni DL del passato sono "orientati al carattere", ossia operano interpretando i gruppi di bit secondo un alfabeto predefinito, come i caratteri dell'alfabeto Internazionale numero 5, noto come ASCII, del CCITT, che sono rappresentati da gruppi di 7 bits. Alcuni di questi caratteri sono utilizzati per trasmettere informazioni di controllo e servizio, come appunto i delimitatori, e nasce allora il problema della trasparenza dei dati quando questi sono inviati dal livello superiore in forma di bit. Infatti, in questo caso, gruppi di bit possono simulare i caratteri di controllo. Anche con i protocolli "orientati al bit" esiste il problema della trasparenza, che però è risolto in modo più semplice che nel caso precedente.

Le funzionalità di questo livello sono andate via via mutando con l'evolversi dei supporti trasmissivi a livello fisico. Con i livelli fisici del passato, il tasso d'errore era notevole, dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-4} . A questo livello si imponeva dunque il controllo e la **correzione dell'errore**, sia nei dati da trasferire ad alto livello, sia nelle segnalazioni fra i protocolli.

Un'altra funzionalità tipica è quella del **controllo di flusso**, ossia il controllo del ritmo di trasmissione in modo che le due entità colloquanti si adeguino alla velocità del più lento, o alle disponibilità di risorse di calcolo o di memoria (buffers).

Per fronteggiare le problematiche introdotte dai canali fisici broadcast, il livello DL è stato suddiviso in due sottolivelli, il più basso dei quali è chiamato **Medium Access Control (MAC)** e il più alto **Logical Link Control (LLC)**.

Il MAC ha lo scopo principale di regolare l'accesso per evitare che più trasmissioni di stazioni diverse e non coordinate si sovrappongano sul canale tramite un protocollo di **accesso multiplo**. Spesso, in questo strato sono inserite le funzioni di indirizzamento, distinguendo i nodi tramite un indirizzo MAC unico per ogni apparato fisico (è il caso delle reti locali Ethernet).

Nel MAC trovano posto funzioni in altri casi collocate nel livello fisico, come le multiplazioni dei bit, le temporizzazioni, eccetera. Più di recente, è stata introdotta la funzione di instradamento a livello MAC (relay di livello 2) per permettere la visione di nodi appartenenti a reti broadcast diverse.

3.3 Il Livello di Rete

Il livello di rete è il livello sovrastante il livello di Data Link e in cui classicamente ha trovato collocazione l'instradamento. I nodi sono distinti da un indirizzo di rete usato da questo livello, che si avvale dei servizi di diversi Data Link ciascuno colloquante con nodi diversi, per determinare il servizio Data Link da utilizzare. Questa operazione viene ripetuta di nodo in nodo finché la PDU di rete giunge a destinazione.

In questo livello trovano posto i protocolli per la gestione dell'instradamento, per il controllo delle connessioni di rete, controllo anti-congestione, ecc. Questi sono servizi che sono localizzati in ogni nodo della rete. Funzionalità diverse possono però essere previste nei nodi terminali della comunicazione o nei protocolli di rete tra sistemi finali (detti anche nodi terminali) e nodi di rete (interfacce di sottorete).

3.4 Il Livello di Trasporto

Il livello di Trasporto è lo strato immediatamente sopra il livello di Rete ed è un livello che fornisce servizi fra i nodi terminali. Dunque questo strato è assente nei nodi di rete e gli unici nodi che vede il trasporto sono gli utenti finali.

Tipici servizi offerti da questo protocollo sono la connessione, il controllo d'errore e il controllo di flusso.

3.5 Il Livello di Sessione

Questo livello è responsabile dell'organizzazione del dialogo fra due programmi applicativi di sistemi d'utente diversi. E' responsabile di funzioni quali la gestione del dialogo e la sincronizzazione degli eventi.

3.6 Il Livello di Presentazione

Questo livello gestisce la sintassi dell'informazione da trasferire ed interviene per esempio quando colloquiano sistemi basati su sistemi operativi diversi, come Unix e IBM o Microsoft.

3.7 Il Livello di Applicazione

E' il livello che include le applicazioni d'utente. Fra queste enumeriamo applicazioni di login remoto, file transfer, e servizi WWW.