**RETI DI CALCOLATORI**

Sommario

[**LEZIONE 1 – INTRODUZIONE ALLE RETI** 3](#_Toc161844918)

[1.1 Tipologie di Reti 4](#_Toc161844919)

[1.2 Tecnologie di comunicazione 5](#_Toc161844920)

[1.3 Topologie 6](#_Toc161844921)

[1.4 Struttura di una rete 8](#_Toc161844922)

[**LEZIONE 2 – MODELLI DI RETE** 9](#_Toc161844923)

[2.1 Protocolli di comunicazione 9](#_Toc161844924)

[2.2 Il modello ISO/OSI 11](#_Toc161844925)

[2.3 Tipologie di Connessione 15](#_Toc161844926)

[2.4 Affidabilità di un servizio 15](#_Toc161844927)

[**LEZIONE 3 – MODELLO TCP/IP E CONFRONTO** 16](#_Toc161844928)

[3.1 Modello TCP/IP 16](#_Toc161844929)

[3.2 Livello Accesso Rete 17](#_Toc161844930)

[3.3 Livello Internet 17](#_Toc161844931)

[3.4 Livello Trasporto 17](#_Toc161844932)

[3.5 Livello Applicazione 18](#_Toc161844933)

[**LEZIONE 4 – LIVELLO FISICO E TEORIA DEI SEGNALI** 18](#_Toc161844934)

[4.1 Basi della trasmissione 18](#_Toc161844935)

[4.2 Mezzi di Trasmissione 19](#_Toc161844936)

[4.3 Tipologia di segnale 19](#_Toc161844937)

[4.4 Analisi Spettrale 19](#_Toc161844938)

[4.4.1 Teorema di Fourier 20](#_Toc161844939)

[4.4.2 Teorema di Nyquist 21](#_Toc161844940)

[4.4.3 Rapporto Segnale/Rumore 22](#_Toc161844941)

[4.4.4 Teorema di Shannon 22](#_Toc161844942)

[4.5 Trasmissione 23](#_Toc161844943)

[4.6 Mezzi trasmissivi 23](#_Toc161844944)

[4.7 Topologie di reti in fibra ottica 25](#_Toc161844945)

[4.8 Trasmissioni wireless 26](#_Toc161844946)

[4.9 Classificazione onde elettromagnetiche 26](#_Toc161844947)

[4.10 Trasmissione e modulazione 28](#_Toc161844948)

[**LEZIONE 5 - SISTEMA TELEFONICO E MODULAZIONE** 28](#_Toc161844949)

[**LEZIONE 6-7-8-9 – IL LIVELLO DATA LINK** 33](#_Toc161844950)

[6.1 Introduzione 33](#_Toc161844951)

[6.2 Progettazione del livello Data Link 33](#_Toc161844952)

[6.3 Operazioni del livello due 35](#_Toc161844953)

[6.4 Suddivisione in frame 35](#_Toc161844954)

[6.5 Rilevazione e correzione degli errori 36](#_Toc161844955)

[6.6 Codici a correzione di errore 37](#_Toc161844956)

[6.7 Codici a rilevazione d’errore 41](#_Toc161844957)

[6.8 Comunicazione ed ACK 43](#_Toc161844958)

[6.9 Struttura di un frame 43](#_Toc161844959)

[6.10 Gestione di sequenza di trasmissione e flusso 44](#_Toc161844960)

[6.10.1 Protocollo Heaven 44](#_Toc161844961)

[6.10.2 Protocollo Stop and Wait 44](#_Toc161844962)

[6.10.3 Protocolli a finestra scorrevole 48](#_Toc161844963)

[6.10.4 Protocolli go-back-n e selective repeat 51](#_Toc161844964)

[6.11 Protocolli del livello Data Link 53](#_Toc161844965)

[6.11.1 HDLC 53](#_Toc161844966)

[6.11.2 SLIP 54](#_Toc161844967)

[6.11.3 PPP 54](#_Toc161844968)

[6.12 Il sottolivello MAC (Medium Access Control) 55](#_Toc161844969)

[6.12.1 Protocollo ALOHA 57](#_Toc161844970)

[6.12.2 Protocolli CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 59](#_Toc161844971)

[6.12.3 Protocolli CSMA/CD (CSMA with Collision Detection) 60](#_Toc161844972)

[6.12.4 Le reti ad anello 61](#_Toc161844973)

[6.13 Lo standard 802 63](#_Toc161844974)

[6.13.1 IEEE 802.3 64](#_Toc161844975)

[6.13.2 Fast Ethernet 71](#_Toc161844976)

[6.13.3 IEEE 802.5 71](#_Toc161844977)

[6.13.4 IEEE 802.2 74](#_Toc161844978)

[6.14 Il Bridge 75](#_Toc161844979)

[6.14.1 Standard IEEE per i bridge 76](#_Toc161844980)

[6.14.2 Switch 78](#_Toc161844981)

[**LEZIONE 10 – LIVELLO NETWORK** 79](#_Toc161844982)

[10.1 Servizi offerti 79](#_Toc161844983)

[10.2 Algoritmi di Routing 80](#_Toc161844984)

[10.3 Principio di ottimalità 80](#_Toc161844985)

[10.4 Classificazione algoritmi di routing 81](#_Toc161844986)

[10.5 Algoritmi di routing statici 81](#_Toc161844987)

[10.5.1 Shortest path routing 81](#_Toc161844988)

[10.5.2 Flooding 82](#_Toc161844989)

[10.5.3 Flow-based routing 82](#_Toc161844990)

[10.6 Algoritmi dinamici 83](#_Toc161844991)

[10.6.1 Distance vector routing 83](#_Toc161844992)

[10.6.2 Link state routing 84](#_Toc161844993)

[10.7 Routing gerarchico 85](#_Toc161844994)

[10.8 Controllo della congestione 86](#_Toc161844995)

[10.8.1 Approccio Traffic shaping (open loop) 87](#_Toc161844996)

[10.8.2 Approccio Choke packet (closed loop) 89](#_Toc161844997)

[10.9 Internetworking 89](#_Toc161844998)

[10.10 Internetwork routing 91](#_Toc161844999)

[**LEZIONE 11 – IL LIVELLO NETWORK (PARTE 2)** 93](#_Toc161845000)

[11.1 Il livello network in Internet 93](#_Toc161845001)

[11.2 Header IP 93](#_Toc161845002)

[11.3 Indirizzi IP 95](#_Toc161845003)

[11.4 Routing IP 97](#_Toc161845004)

[11.5 Subnet e Subnet Mask 98](#_Toc161845005)

# **LEZIONE 1 – INTRODUZIONE ALLE RETI**

Il primo argomento da introdurre quando si parla di reti di calcolatori è la differenza tra essi e i sistemi distribuiti.

**Un sistema distribuito** è un insieme di computer indipendenti che appare ai propri utenti come un singolo sistema coerente. Un classico esempio di sistema distribuito è il World Wide Web.

Altri esempi:

GRID Computing: risorse di calcolo distribuite su diverse aree geografiche

▶ Cloud Computing: esecuzione remota di codice ed applicativi

▶ Edge Computing: esecuzione di operazioni remote nel punto di

acquisizione dei dati

**In una rete di calcolatori** mancano la coerenza, il modello ed il software tipico di un sistema distribuito. Gli utenti della rete vedono i singoli componenti di essi, un utente difatti per eseguire un programma che si trova su una specifica remota della rete deve collegarsi manualmente ad essa per eseguirlo.

## 1.1 Tipologie di Reti

Suddividiamo principalmente due tipologie di reti:

**Cablate:** (Rame, fibra ottica) da cui discendono le seguenti reti:

* LAN (Local Area Network) 🡪 rete locale/aziendale che va dai 10m – 1km
* MAN (Metropolitan Area Network) 🡪 rete metropolitana che va dai 100m – 10km
* WAN (Wide Area Network) 🡪 rete geografica che va dai 10km – 1000km

**Wireless**: (Radiofrequenze, infrarossi) da cui discendono le seguenti reti:

* WPAN (Wireless Personal Area Network) 🡪 rete di piccolissime distanze (cm). Rete tipica di NFC, Bluethoot, IR
* WLAN (Wireless Local Area Network) 🡪 come rete LAN, ma senza fili.
* WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) 🡪 come rete MAN, ma senza fili.
* WWAN (Wirless WAN) 🡪 rete geografica wirless

Diverse tipologie di reti possono essere interconesse tra di loro formando reti sempre più grandi (Internet)

Immagine che contiene schermata, diagramma

Descrizione generata automaticamente

## 1.2 Tecnologie di comunicazione

Le reti di calcolatori dispongono di un’altra caratteristica principale: la tecnologia di trasmissione.

Le tecnologie di trasmissione possiamo dividerle in due tipi:

**1.Trasmissione punto a punto**: Ogni calcolatore deve connettersi direttamente ad un altro calcolatore. Se due calcolatori non sono direttamente collegati, è necessario creare un instradamento attraverso altri calcolatori. Bisogna sempre raggiungere un nodo nella rete.

Risulta essere costoso per via delle numerose connessioni dedicate.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page8image29424048page8image13301760page8image13301200 | | | |
|  |  | |  |

**2.Trasmissione broadcast**: sono dotate di un unico canale di comunicazione (bus). Ogni calcolatore ha un identificativo univoco (indirizzo di rete)

Il pacchetto viene inviato da una macchina a tutte le altre macchine, ma viene letto solamente dal destinatario esaminando il proprio indirizzo di rete.

Alcuni sistemi broadcast supportano la trasmissione a un sottoinsieme delle macchine, tale tecnologia viene chiamata multicast. Infine, la connessione di due o più reti è chiamata internetwork.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page9image29416560page9image13332064page9image13332960 | | | |
|  |  | |  |

Non tutti i calcolatori possono trasmettere simultaneamente sul bus e quindi è necessario un sistema di regole che si dividono in:

**Regole statiche:** vengono prefissate e non possono cambiare nel tempo come ad esempio una politica di round robin con time slicing.

Ci saranno, ovviamente, spreco di tempo e risorse se un calcolatore non deve trasmettere.

**Regole dinamiche:** Di volta in volta si decide chi può utilizzare il mezzo di trasmissione.

Possono essere centralizzate (un’ unità centrale decide chi può iniziare la trasmissione) o distribuite (un calcolatore può decidere se trasmettere in base allo stato del mezzo).

Possibili collisioni.

## 1.3 Topologie

La topologia è un concetto diverso dalla tipologia.

La topologia definisce come gli apparati di rete sono collegati tra di loro. Ogni elemento connesso nella rete è detto nodo e l’’informazione scambiata è detta pacchetto.

Suddividiamo topologia logica (come i dati vengono scambiati tra i nodi) e topologia fisica (dislocazione fisica dei noti. Ogni topologia risulterà essere un grafo)

Esistono varie topologie fisiche tra cui:

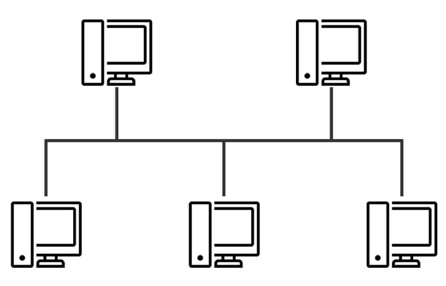
**Rete a bus**:

Le informazioni viaggiano su un unico canale.

Tutti i nodi possono leggere le informazioni in viaggio. In particolare, un nodo NON destinatario riceve il pacchetto, ma lo scarta. Un nodo destinatario lo legge.

PRO: Semplice da realizzare e da estendere.

CONTRO: Velocità ridotte.



**Rete ad anello:**

Le informazioni viaggiano su un unico canale.

Ci sono due modalità:

**Unidirezionale:** i pacchetti sono trasmessi in senso orario o antiorario.

**Bidirezionale:** i pacchetti sono trasmessi in entrambe le direzioni

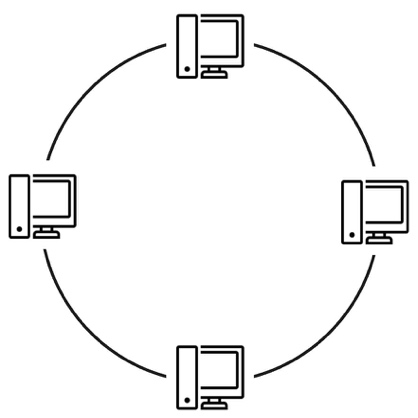
Nella rete ad anello, un nodo NON destinatario inoltra al successivo il pacchetto.

Un nodo destinatario lo legge e blocca l’inoltro.

Se il pacchetto torna al mittente, la comunicazione si interrompe ( destinatario non trovato)

PRO: Semplice da estendere e veloce

CONTRO: Bassa tolleranza ai guasti.



**Rete a stella:**

Esiste un nodo centrale che gestisce la comunicazione.

Le informazioni vengono inviate ad un nodo centrale che funge da “router” e indirizza il pacchetto verso il destinatario.

PRO: Semplice da realizzare, buone velocità

CONTRO: Tolleranza ai guasti parziale.

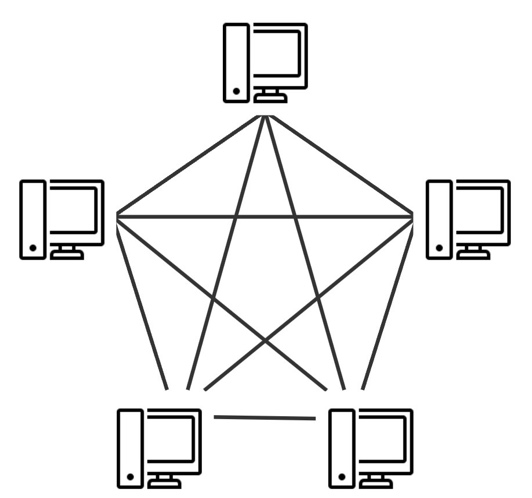
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page14image29645936page14image16050912page14image16054384 | | | |
|  |  | |  |

**Rete a maglia (mesh)**

Si tratta di una rete in cui tutti i nodi sono collegati tra loro e ciascuno di essi ne riesce a raggiungere un altro attraverso un solo passaggio. Nel caso in cui uno dei cavi dovesse rompersi sarebbe possibile comunque l’arrivo a destinazione dei pacchetti. Si viene dunque a formare una maglia con percorsi multipli tra i nodi.

Tutti i nodi possono leggere le informazioni in viaggio.

Un nodo non diestinatario riceve il pacchetto, ma lo scarta, mentre il nodo destinatario lo legge.



PRO: Massima velocità e tolleranza ai guasti.

CONTRO: Costo elevato e difficile realizzazione.

## 1.4 Struttura di una rete

Una rete è strutturata dai seguenti componenti:

**Host** (unità di calcolo)

**Subnet** (Sottorete composta da tutti i nodi di una singola rete)

**Mezzo di trasmissione**

**Dispositivi di rete** che si occupano di instradare la comunicazione nella sottorete o verso le reti esterne 🡪 Modem, Gateway, Router, Switch ecce cc.



* Anche se esistono regole standard per le reti queste sono eterogenee tra di loro
* Una rete può comunicare con un’altra di diverso tipo
* Possono inoltre comunicare reti basate su mezzi di trasmissione differente

▶ Cablata <—> Satellite

▶ Radio <—> Cablata

▶ Satellite <—> Radio

• Internetwork - collega reti di diversa tipologia utilizzando dei router multiprocollo detti gateway

* + ▶  LAN <—> MAN <—> WAN
  + ▶  I gateway effettuano sia il routing (instradamento) sia la conversione

di protocollo.

# **LEZIONE 2 – MODELLI DI RETE**

## 2.1 Protocolli di comunicazione

Visto che la rete è eterogenea (diverse tipologie e tecniche di comunicazione e scambio dati) è necessario definire un insieme di regole specifiche. Tali regole sono dette protocolli.

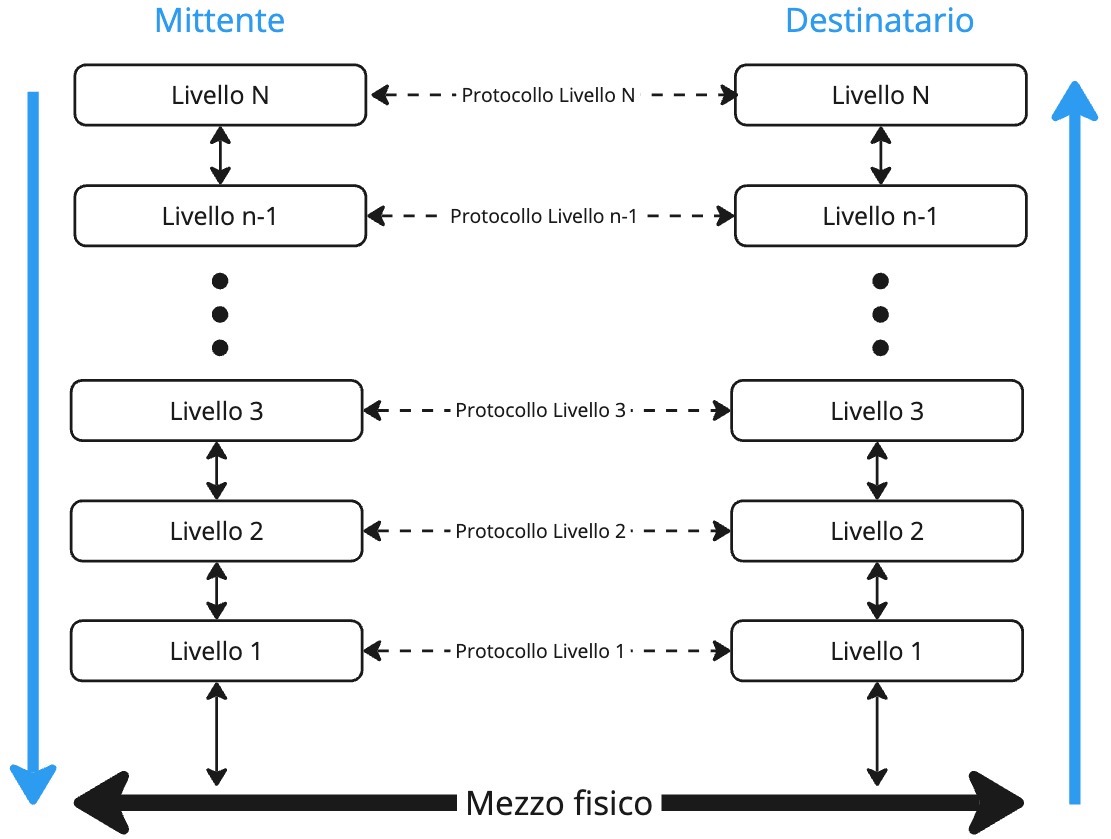
**Def: Insieme coordinato di regole che consente a due interlocutori (un utente e un calcolatore elettronico, due utenti oppure due calcolatori) di scambiarsi rapidamente e univocamente dati e messaggi.**

Una rete principalmente è organizzata a livelli (o strati) dove ogni livello ha una propria responsabilità nella rete.

Ogni elemento di un livello **n** comunica con lo strato successivo **n+1 (service user)** e quello precedente **n-1** **(service provider)** mediante interfacce di comunicazione dette **SAP** (un livello NON può comunicare con livelli non adiacenti)

Ogni livello interagisce con il suo corrispettivo sull’host mittente/destinatario.

L’insieme dei protocolli di una singola architettura è detto **Stack di protocolli**.



COME AVVIENE LA COMUNICAZIONE TRA LIVELLI ?

Facciamo un esempio con un’architettura a 5 livelli (N=5)

1) Un messaggio M parte dal livello più alto (n=5).

2) Il messaggio viene inviato al livello n-1 (4)

3) Il livello 4 inserisce un header con informazioni di controllo (H4).

4)Si passa il pacchetto al livello n-1 (3)

* Esiste una dimensione massima per ogni pacchetto
* Il pacchetto deve essere scomposto in pacchetti più piccoli (M1, M2).
* Nuove informazioni di controllo vengono aggiunte ad ogni porzione (H3) N.B. Le informazioni di controllo precedenti non vengono suddivise!

5) Il pacchetto viene inviato al livello n-1 (2). Vengono aggiunte informazioni di controllo (H2) ed informazioni dette trailer per determinare il termine del pacchetto (T2).

6) Il messaggio può essere inviato tramite mezzo fisico.

7) Si risale l’albero verso il livello più grande

8) Ad ogni livello n+1 vengono lette le informazioni di controllo.

N.B. Le informazioni di controllo sono utilizzate dai protocolli dello stesso livello

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page7image29682656page7image15803360page7image15805824 | | | |
|  |  | |  |

Ogni livello ha un determinato compito, es:

* **Indirizzamento**,
* **Controllo errori di trasmissione**
* **Frammentazione**
* **Controllo degli errori**
* **Trasferimento di dati (Simplex, Half-Duplex, Full-Duplex)**
* **Multiplexing**

Le operazioni che un livello effettua per utilizzare un servizio sono dette **primitive** e coinvolgono il livello n e i suoi adiacenti.

Ogni primitiva ha associata una corrispettiva risposta con il livello da raggiungere.

## 2.2 Il modello ISO/OSI

Il **modello ISO/OSI** è il modello di riferimento per le architetture di rete, difatti è chiamato standard de iure (standard di diritto poiché è nato dopo lo standard TCP/IP 🡪 de facto) e si tratta solo di uno schema concettuale che i produttori di hw di rete devono seguire.

E’ un modello composto da 7 livelli (3 fisici, 4 applicativi).

Quando il mittente spedisce verso il destinatario si tratta di incapsulamento poiché verranno aggiunte informazioni.

Quando il destinatario riceve il messaggio si tratta di decapsulamento poiché ricostruisce il messaggio.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page13image29732432page13image15755328page13image15745360 | | | |
|  |  | |  |

SINTESI DEL FUNZIONAMENTO DEI LIVELLI:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| # | Livello | Definizione |
| 7 | Applicazione | Interfaccia tra il sistema di comunicazione e le applicazioni |
| 6 | Presentazione | Formatta e trasforma i dati in base la loro rappresentazione locale. Fornisce anche la cifratura/decifratura dei dati |
| 5 | Session | Si occupa delle sessioni di comunicazione, dall’inizializzazione alla chiusura |
| 4 | Trasporto | Invio e ricezione dei dati. Controllo e correzione (se possibile) degli errori |
| 3 | Rete | Creazione dei pacchetti, indirizzamento ed instradamento degli stessi ad alto livello (astrazione) |
| 2 | Data Link | Definizione del frame e dell’indirizzamento in funzione del mezzo fisico |
| 1 | Fisico | Trasmissione dei dati tramite il mezzo fisico |

**Livello Fisico:** Il livello fisico si occupa della trasmissione dei dati grezzi (bit) su un canale di comunicazione.

Specifica le caratteristiche meccaniche, elettriche e procedurali dell’apparato di connessione.

Inoltre, specifica le caratteristiche del mezzo fisico tra cui le tensioni scelte, durata di un singolo bit, tipo di trasmissione ecc.

Problemi tipici di questo livello sono i tempi di trasmissione del segnale, come avviene l’inizio e la fine della comunicazione o se la comunicazione può avvenire simultaneamente in entrambe le direzioni.

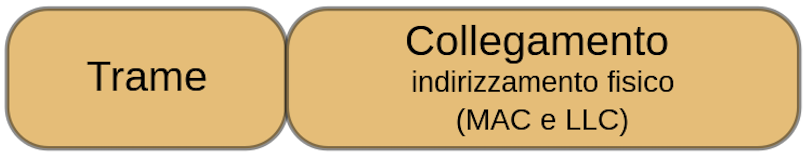
BIT 🡪 FISICO(Mezzo, Segnale e trasmissione binaria)

**Livello Data Link:** Il livello data link si occupa di trasformare i pacchetti ricevuti dal livello Network in frame che vengono inviati in sequenza al livello fisico.

Al termine del framing i dati diventano parte di un **nuovo pacchetto, dotato di un’intestazione (header) e di una coda (tail)**, che hanno la funzione anche di sequenza di controllo. Per ogni pacchetto ricevuto **il destinatario trasmette al mittente un segnale di ACK** (*Acknowledgment*), ovvero di conferma di ricevuta.

In questo modo il mittente è in grado di **capire quali pacchetti siano o meno arrivati a destinazione**. Nel caso di pacchetti corrotti, incompleti, persi o mal trasmessi, il mittente deve occuparsi della loro ritrasmissione.

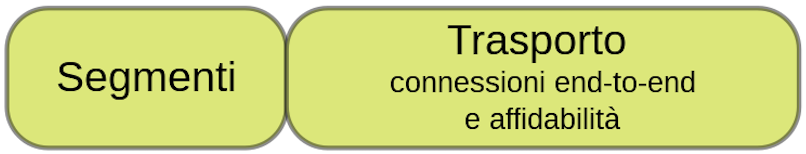
Il livello 2 **si occupa anche del controllo di flusso dei dati** e di tutta una serie di interventi correttivi nel caso in cui venga registrato uno sbilanciamento della velocità di trasmissione mediante un sottolivello chiamato MAC (Media Access Control).



**Livello di Rete (Network Layer):** Questo livello si occupa del routing dei dati attraverso una rete composta da più collegamenti e nodi. I principali compiti includono l'instradamento dei pacchetti, la gestione degli indirizzi IP e il controllo del traffico per evitare congestioni. Il protocollo IP (Internet Protocol) è uno degli esempi più noti di protocollo di livello di rete.**Immagine che contiene testo, Carattere, giallo

Descrizione generata automaticamente**

**Livello di Trasporto (Transport Layer):** Il livello di trasporto si concentra sulla trasmissione end-to-end dei dati tra i dispositivi. Fornisce servizi come la segmentazione dei dati in pacchetti più piccoli, il controllo degli errori e il controllo del flusso. Due protocolli chiave a questo livello sono **TCP** (Transmission Control Protocol) e **UDP** (User Datagram Protocol).



**Livello di Sessione (Session Layer):** Questo livello è responsabile dell'apertura, della gestione e della chiusura delle sessioni di comunicazione tra dispositivi. Aiuta a stabilire e mantenere il dialogo tra le applicazioni su entrambi i lati della comunicazione. Può includere funzionalità come il controllo della sincronizzazione e la gestione delle sessioni.



**Livello di Presentazione (Presentation Layer)**: Il livello di presentazione si occupa della traduzione, dell'elaborazione e della conversione dei dati in un formato comune comprensibile da entrambi i dispositivi. Questo livello può gestire la crittografia per la sicurezza dei dati, la compressione per ridurre la larghezza di banda necessaria e la conversione dei formati dati.



**Livello di Applicazione (Application Layer):** Questo è il livello più alto e fornisce servizi direttamente alle applicazioni utente. Include una vasta gamma di protocolli e servizi che consentono alle applicazioni di comunicare attraverso la rete. Esempi di protocolli di livello di applicazione includono HTTP per il web, SMTP per la posta elettronica, FTP per il trasferimento di file e molti altri.

## 2.3 Tipologie di Connessione

**Connection-Oriented**: Si stabilisce la connessione, si stabilisce un percorso (instradamento), si effettua la comunicazione inviando i pacchetti ed infine si rilascia la connessione.

Il percorso è definito a priori.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page25image29452240page25image13294368page25image13290000 | | | |
|  |  | |  |

**Connectionless:** I pacchetti vengono inviati sulla rete senza un percorso predefinito e potrebbero arrivare in ordine sparso o perdersi.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page26image29478976page26image13177552page26image13173744 | | | |
|  |  | |  |

## 2.4 Affidabilità di un servizio

**ACK:** Sistema di notifica di azioni tra hosts

**RELIABLE**: I dati devono essere tutti consegnati al destinatario e per ogni pacchetto ricevuto viene inviato un ack al mittente. E’ affidabile, ma lento.

**UNRELIABLE:** Non c’è nessuna garanzia che i dati vengano consegnati. E’ veloce, ma poco affidabile.

E’ possibile andare a combinare connessione ed affidabilità per ottenere servizi:

**Reliable Connection-Oriented:** Altamente affidabile

**Reliable Connectionless:** I dati saranno ricevuti tutti, ma non nell’ordine desiderato. Vengono utilizzati ACK.

Anche chiamato acknowledged datagram service

**Unreliable Connection-Oriented:** Possibili perdite di dati

**Unreliable Connectionless**: Altamente inaffidabile con possibili perdite di dati non ordinati. Anche chiamato datagram service

# **LEZIONE 3 – MODELLO TCP/IP E CONFRONTO**

## 3.1 Modello TCP/IP

Il modello TCP/IP è un modello di comunicazione di rete che è stato sviluppato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti ed è ampiamente utilizzato per la progettazione, l'implementazione e la gestione delle reti di computer. È stato creato prima del modello OSI (Open Systems Interconnection) ed è ancora comunemente utilizzato come modello di riferimento per la comprensione delle reti di computer (**standard de facto**). Il modello TCP/IP contiene protocolli multipli oltre a quelli da cui prende il nome.

Il modello TCP/IP è diviso in quattro livelli, ciascuno dei quali svolge un ruolo specifico nella trasmissione dei dati attraverso una rete.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page3image29756880page3image15731328page3image15729424 | | | |
|  |  | |  |

Come si può notare, nel modello TCP/IP:

* Il livello **Applicazione** comprende il livello **Presentazione** e **Sessione** del modello ISO/OSI
* Viene ridefinito il livello **Rete** in livello **Internet**
* Il livello **Accesso Rete** comprende sia il livello **Collegamento** sia quello **Fisico**

## 3.2 Livello Accesso Rete

In inglese **host-to-network.**

Questo è il livello più basso del modello e si occupa della trasmissione dei dati su un singolo collegamento fisico. Include protocolli e tecnologie per la gestione dell'accesso al mezzo di trasmissione, la rilevazione degli errori e la trasmissione affidabile dei dati all'interno dello stesso segmento di rete. Alcuni esempi di protocolli di livello di collegamento includono Ethernet e Wi-Fi.

Non specifica come questo debba funzionare nel dettaglio e lascia la possibilità di utilizzare I dispositive di rete con propri protocolli ( Nel caso di comunicazione con dispositivi differenti l’apparato di rete provvederà alla conversione multiprotocollo ).

## 3.3 Livello Internet

Questo livello gestisce il routing dei dati tra diversi segmenti di rete. È responsabile della consegna dei pacchetti da un nodo a un altro attraverso una serie di reti interconnesse. Il protocollo principale di questo livello è l'Internet Protocol (IP), che assegna indirizzi IP unici a ciascun dispositivo nella rete e determina come i pacchetti di dati vengono instradati da un dispositivo all'altro.

## 3.4 Livello Trasporto

Questo livello si occupa del trasferimento dei dati end-to-end tra dispositivi. È responsabile del controllo del flusso, della segmentazione dei dati in pacchetti più piccoli e della gestione degli errori. Due dei protocolli più noti a questo livello sono il Transmission Control Protocol (TCP), che fornisce una comunicazione affidabile, e il User Datagram Protocol (UDP), che è più veloce ma meno affidabile.

**TCP**:

* Reliable Connection-Oriented
* Mittente - Frammenta il messaggio in pacchetti
* Destinatario - I pacchetti vengono riuniti per ricostruire il messaggio

**UDP**:

* Unreliable Connectionless
* Perdita di pacchetti

## 3.5 Livello Applicazione

Questo è il livello più alto e contiene le applicazioni che consentono agli utenti di interagire con la rete. Include una vasta gamma di protocolli e servizi, come HTTP per il web, SMTP/POP/IMAP per la posta elettronica, FTP per il trasferimento di file, DNS per il mapping degli indirizzi IP e molti altri. Questo livello si interfaccia direttamente con le applicazioni utente e fornisce loro l'accesso ai dati di rete.

Il modello TCP/IP nasce come modello di riferimento e non si fa troppa distinzione tra protocolli, servizi ed interfacce.

# **LEZIONE 4 – LIVELLO FISICO E TEORIA DEI SEGNALI**

## 4.1 Basi della trasmissione

Un segnale sinusoidale è una forma d’onda periodica e regolare che si ripete in un periodo di tempo *t*

L'informazione può essere trasmessa a distanza variando opportunamente una qualche caratteristica fisica del segnale scelto per la trasmissione.

Il segnale, inoltre, si propaga attraverso un qualche mezzo di trasmissione con una certa velocità *t* per un intervallo di tempo 𝛥*t*

Il segnale ha le seguenti caratteristiche:

* **Ampiezza (A)**: Differenza fra il valore massimo ed il valore minimo
* **Periodo (T)**: Quantità di tempo prima della ripetizione del segnale
* **Frequenza (F)**: Numero di oscillazioni sul periodo T (1/T)
* **Fase (Φ)**: Scostamento dall’origine

Immagine che contiene diagramma, linea, Diagramma

Descrizione generata automaticamente

## 4.2 Mezzi di Trasmissione

Il segnale può essere trasmesso principalmente attraverso tre diversi fenomeni fisici associati ad un determinato mezzo di trasmissione

• **Corrente elettrica** 🡪 Cavi in rame  
• **Luce** 🡪 Fibra ottica  
• **Onde elettromagnetiche** 🡪 Wireless (una combinazione di campo elettrico e campo magnetico variabili, che propagandosi nello spazio è in grado di indurre a distanza una corrente elettrica in un dispositivo ricevente (antenna).

## 4.3 Tipologia di segnale

Il segnale si divide in due categorie:

* ***Analogico***: il valore del segnale può variare ***gradualmente*** in un intervallo costituito da un ***numero infinito*** di possibili valori;
* ***Digitale***: il segnale varia ***bruscamente*** assumendo in ogni istante solo uno di un ***insieme finito di valori.***

I fenomeni naturali sono tutti esclusivamente analogici.

A causa dell’interazione con il mezzo trasmissivo, la ***forma del segnale a destinazione non sarà mai esattamente quella di partenza***.

## 4.4 Analisi Spettrale

### 4.4.1 Teorema di Fourier

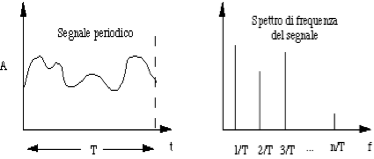
Una funzione **g(t),** definita in un intervallo finito T, può essere considerata come una funzione periodica di periodo T, e quindi espressa come somma di un numero infinito di funzioni sinusoidali

Immagine che contiene Carattere, calligrafia, testo, linea

Descrizione generata automaticamente

* Tale funzione può essere vista anche in base alla frequenza fondamentale **f = 1/T**
* **an** e **bn** sono le ampiezze dell’ennesima armonica che ha frequenza **n∗f**
* ***c*** è detto coefficiente di Fourier

Un qualunque segnale ***g(t)***, di durata T, può essere rappresentato dal suo ***spettro di frequenze*** (la sua scomposizione in sinusoidi).



* L’analisi spettrale porta a vedere il segnale rappresentato da un insieme di frequenze
* Queste frequenze rappresentano le sue sinusoidi
* La scomposizione in frequenze è detto spettro di frequenze
* L’intervallo delle frequenze di tutte le sinusoidi è detto **frequency band**
* Minore è la durata del periodo T, maggiore sarà il valore della frequenza fondamentale
* Quanto più velocemente varia g(t), tanto più numeroso sono le armoniche che la descrivono

Dato un mezzo fisico di comunicazione abbiamo che le seguenti definizioni:

* **Banda passante** - intervallo di frequenze che il mezzo fisico è in grado di trasmettere senza alterarle oltre certi limiti
* **Attenuazione e Ritardo** - Alterazioni del segnale. L’attenuazione dipende dalla frequenza del segnale ed è proporzionale alla distanza percorsa
* **Ampiezza di banda** - quantità di informazioni che è possibile trasmettere in un determinato lasso di tempo. (Possono esserci delle attenuazioni sulle bande tramite l’utilizzo di filtri (es. passa-basso, passa-banda)

***Nella trasmissione in un mezzo trasmissivo***:

l*’****attenuazione*** *subita dal segnale* ***dipende dalla frequenza*** *del segnale* ***ed è proporzionale alla distanza percorsa****;*

*se la* ***banda passante*** *è inferiore alla* ***banda di frequenza****, il segnale viene* ***distorto*** *(****privato di alcune armoniche****).*

***Se un numero sufficiente di armoniche arriva a destinazione, il segnale è comunque utilizzabile****.*

Un segnale, anche se distorto, può essere ricostruito se un numero sufficiente di armoniche giunge a destinazione

### 4.4.2 Teorema di Nyquist

Un segnale analogico di banda h può essere completamente ricostruito mediante una campionatura effettuata 2 ∗ h volte al secondo

***In ambito binario***: Se ciascun campione può assumere uno di ***n*** valori distinti, ***il segnale risulta completamente rappresentato*** con ***2\*h\*(lg n) bit per ogni secondo (lg 🡪 log in base 2)***

Tale valore è chiamato anche **bit rate**

***Baud rate:*** *Velocità di comunicazione (numero di volte in un secondo in cui è possibile cambiare il valore)*

### 4.4.3 Rapporto Segnale/Rumore

Non esiste un canale di comunicazione perfetto, per cui è sempre possibile che il segnale sia distorto.

Si utilizza il rapporto segnale/rumore (signal to noise ratio)

SNR = 10 ∗ log(S/N) (log 🡪 log in base 10) e si misura in decibe (db)

|  |  |
| --- | --- |
| Rapporto S/N | Decibel |
| 2 | 3 |
| 10 | 10 |
| 100 | 20 |
| 1000 | 30 |

*Il teorema di Nyquist è valido per canali totalmente privi di disturbi* (purtroppo non è realistico).

### 4.4.4 Teorema di Shannon

il massimo data rate di un canale rumoroso, con banda passante di ***h Hz*** e rapporto segnale/rumore pari a ***S/N***, è dato da: ***massimo data rate (bit/sec)= h\*lg2(1+S/N)***

Su un canale con banda ***3k Hz e S/N=30dB*** (tipici di una normale linea telefonica) massimo si può arrivare a ***30.000 bps.***

***In generale***:

* più alto è il numero di ***bps*** da trasmettere, più ampia deve essere la banda passante;
* a parità di mezzo utilizzato, minore è la lunghezza del canale di trasmissione tanto più è alto il numero di ***bps*** che si possono trasmettere (attenuazioni e sfasamenti restano accettabili);
* la trasmissione digitale è più critica di quella analogica (genera frequenze più alte), ma può essere più facilmente "rigenerata" lungo il percorso (in quella analogica ogni amplificazione introduce distorsione, che si somma a quella degli stadi precedenti).

## 4.5 Trasmissione

Trasmissione **baseband** (trasmissione in banda base): la singola trasmissione impegna l'intera banda passante.

Trasmissione **broadband**: attraverso opportune tecniche di multiplazione si effettuano contemporaneamente più trasmissioni distinte (nella telefonia con broadband si indicano trasmissioni che impegnano più di 4 kHz)

## 4.6 Mezzi trasmissivi

**Doppino intrecciato**: coppia di conduttori in rame intrecciati in forma elicoidale (**l’intreccio riduce i disturbi causati dalle interferenze)**

* usato, in particolare, per le connessioni terminali del sistema telefonico (da casa dell’utente alla centrale più vicina).
* larghezza di banda - dipende dalla distanza (100 -1000 Mb/s a 100 metri).

**Cavo coassiale**: conduttore centrale in rame circondato da uno strato isolante all'esterno del quale vi è una calza metallica, il tutto rivestito in plastica. Il miglior isolamento, rispetto al doppino, consente maggiori velocità di trasmissione e distanze superiori.

Immagine che contiene diagramma, schizzo, cerchio, testo

Descrizione generata automaticamente

* Usato in passato nel sistema telefonico per le tratte a lunga distanza, è ormai sostituito quasi ovunque dalla fibra ottica (oggi è usato per la TV via cavo ed in vecchie LAN)

***Fibra ottica***: sottilissimo cilindro centrale in vetro (***core***), circondato da uno strato esterno (***cladding***) di vetro avente un diverso indice di rifrazione e da una guaina protettiva.

In genere più coppie sono contenute insieme in una stessa guaina esterna.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page19image29606512page19image16029040page19image16033744 | | | |
|  |  | |  |

Un sistema di trasmissione ottico ha tre componenti

1. **sorgente luminosa** 
   1. converte un segnale elettrico in impulsi luminosi (può essere un LED o un laser)
2. **mezzo di trasmissione**
   1. fibra ottica
3. **fotodiodo ricevitore** 
   1. converte gli impulsi luminosi in segnali elettrici (l’ordine dei Gbps deriva dal tempo di risposta dei fotodiodi che è dell’ordine del nsec)

***Quando un raggio di luce attraversa il confine fra il core ed il cladding subisce una deviazione.***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page20image29562560page20image13285712page20image13276304 | | | |
|  |  | |  |

La deviazione dipende dagli ***indici di rifrazione*** dei due materiali ed è tale che ***per certi angoli di incidenza***, ***il raggio resta intrappolato all'interno del core***.

Le fibre ottiche si dividono in:

* ***multimodali***: (**core di 50 micron**) raggi diversi con diversi angoli (***mode***) possono contemporaneamente propagarsi nella stessa fibra;
* ***monomodali***: (**core di 8-10 micron**) la luce di un singolo raggio avanza nella fibra che si comporta come una ***guida d'onda***. Sono più costose ma garantiscono distanze maggiori (fino a 30 km).

Nelle fibre ottiche un impulso luminoso rappresenta un **1**, mentre la sua assenza rappresenta uno 0.

* Le attuali fibre consentirebbero velocità di trasmissione di 50 Tbps ad un bassissimo tasso d’errore
* Mancando al momento sistemi di conversione luminoso/elettrico in grado di operare a tali velocità, la pratica corrente limita l’uso delle fibre a qualche Gbps

La ***bassa attenuazione*** nella trasmissione in fibra è dovuta:

* alla ***particolare trasparenza*** delle fibre ottiche (se il mare fosse fatto di questo vetro si vedrebbe il fondo...);
* all’utilizzo di ***tre particolari bande (finestre)*** per la trasmissione (tutte tra ***infrarosso e UV***: 0.85μ, 1.30μ, 1.55μ –perdita di meno del 5% per Km-), larghe da 25.000 GHz a 30.000 Ghz ciascuna.

## 4.7 Topologie di reti in fibra ottica

**Anello**: concatenando più fibre ottiche si crea un anello. L'interfaccia del singolo sistema può essere passiva (fa passare l'impulso luminoso nell'anello) o attiva (converte l'impulso luminoso in elettrico, lo amplifica e lo riconverte in luce);

**Stella passiva**: l'impulso, inviato da un trasmettitore, arriva in un cilindro di vetro al quale sono attaccate (fuse) tutte le fibre ottiche. Si realizza così una rete broadcast.

***Vantaggi*** delle fibre ottiche rispetto al rame:

* **banda**:*due fibre sono più capaci di 1000 doppini*;
* **peso**: *100 kg/km contro 8.000 kg/km*;
* ***totale insensibilità a disturbi elettromagnetici***;
* ***difficili intrusioni***.

**Svantaggi** delle fibre ottiche rispetto al rame:

* ***costo delle giunzioni***;
* ***comunicazione unidirezionale***

## 4.8 Trasmissioni wireless

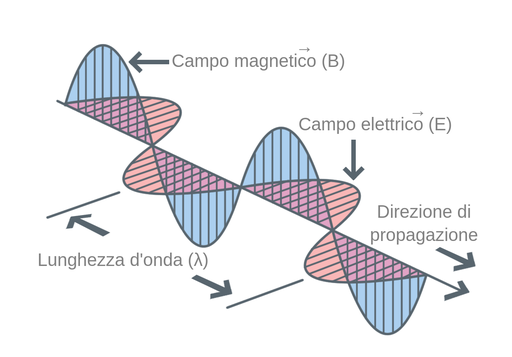
Si utilizzano le onde elettromagnetiche che viaggiano nel vuoto alla velocità della luce (c=3\*10^8 m/s).

In particolare:

Un’onda elettromagnetica monocromatica (cioè con una ben definita frequenza e lunghezza d’onda) è costituita da un campo elettrico (E) e un campo magnetico (B) mutuamente perpendicolari che oscillano in fase fra loro perpendicolarmente alla direzione di propagazione

**Caratteristiche di un’onda elettromagnetica:**

* **Frequenza f: numero di oscillazioni al secondo. Si misura in Hertz (Hz)**
* **Lunghezza d’onda λ: distanza tra due massimi o minimi consecutivi.**
* **La velocità c è data dalla relazione c = f ∗ λ**



La lunghezza d’onda decresce al crescere della frequenza. λ=c/f

## 4.9 Classificazione onde elettromagnetiche

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |
| page32image53433840page32image35573584page32image35571568 | | | |
|  |  | |  |

* **Onde radio a bassa frequenza**

Sono le onde VLF, LF, MF.

Si propagano in tutte le direzioni e passano attraverso gli edifici percorrendo lunghe distanze.

Sono soggette ad interferenze elettromagnetiche.

* **Onde radio ad alta frequenza**

Sono le onde HF, VHF.

Con queste frequenze inizia ad aversi una propagazione in linea retta con lambda (lungh. Onda) dell’ordine del cm/mm.

Rimbalzano gli ostacoli e tendono essere assorbite dal suolo.

Vengono impiegate per le trasmissioni direzionali, le onde che colpiscono la ionosfera vengono rifratte e rispedite sulla terra.

Sono soggette ad interferenze elettromagnetiche.

* **Microonde**

Sono onde con frequenza intorno ai 100Mhz e si propagano in linea retta.

A causa della curvatura della terra, la trasmissione oltre certe distanze richiede l’uso di ripetitori (la distanza fra i ripetitori cresce come la radice quadrata dell’altezza delle torri: per torri alte 100 m i ripetitori possono essere distanti 80 Km).

Usate per trasmissioni a grande distanza e come bande per applicazioni industriali-scientifiche-mediche.

A causa della dispersione nello spazio alcune onde possono essere rifratte, e quindi arrivare in ritardo e fuori fase (Multipath Fading: distruzione del segnale causata dall’arrivo fuori fase di onde rifratte).

Per bande fino a circa 8 Ghz, le onde vengono assorbite dall’acqua (pioggia)

* **Onde infrarosse e millimetriche**

Usate per comunicazioni su piccole distanze (telecomandi televisori)

Sono relativamente direzionali.

Non passano attraverso corpi solidi

Usate in ambienti chiusi

Non interferiscono con quelle impiegate nei locali attigui (usando il proprio telecomando non si cambia il canale al televisore del vicino).

## 4.10 Trasmissione e modulazione

Le informazioni si trasmettono tramite modulazione

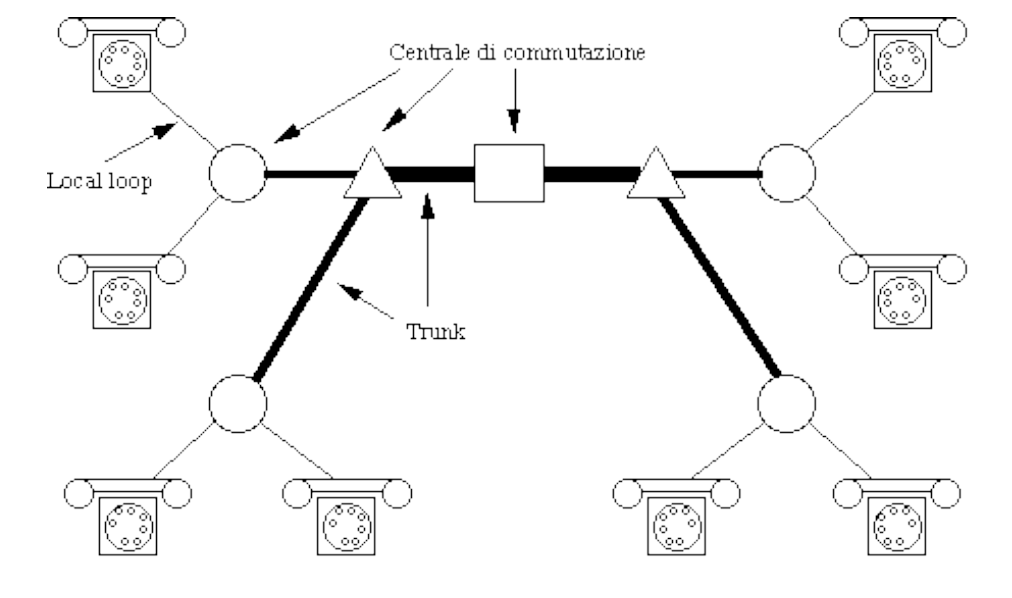
Si possono modulare

* Ampiezza (A)
* Frequenza (f )
* Fase (Φ)

# **LEZIONE 5 - SISTEMA TELEFONICO E MODULAZIONE**

Il sistema telefonico (**rete pubblica telefonica commutata)** è nato ed evolutosi per la fonia, poco adatto per la trasmissione dati

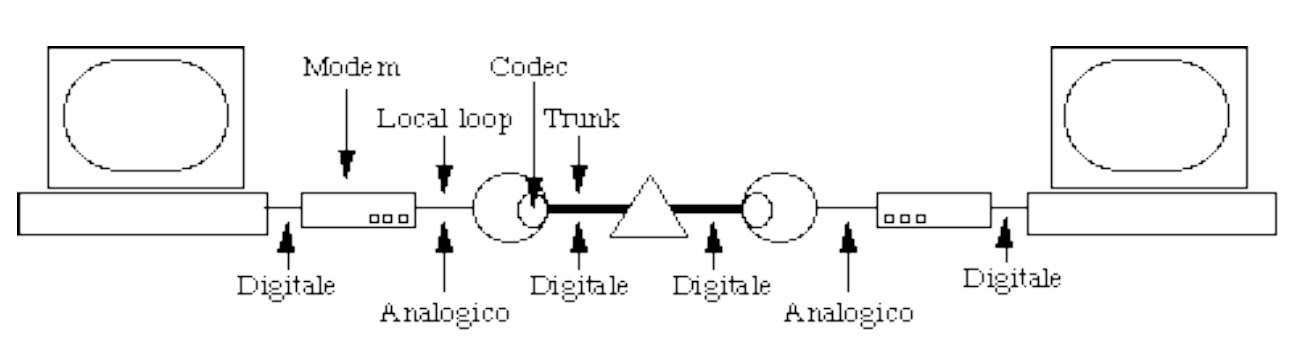
I sistemi telefonici attuali seguono una **gerarchia multilivello** con elevata ridondanza



**Local loop:** collega il telefono alla più vicina **centrale di commutazione**. Il collegamento è realizzato principalmente da un **doppino** lungo da 1 a 10km e trasporta un segnale analogico che occupa una **banda di 3 kHz 🡪** detto anche **ultimo miglio**

**Centrali di commutazioni:** quasi sempre digitali perché, oltre a data rate più alti, è più facile sia ricostruire il segnale senza introdurre errori e mescolare voce, dati, video.

**Trunk:** collegano le **centrali di commutazioni**. I collegamenti sono realizzati tipicamente in **fibra ottica**



**Modem:** effettua la trasformazione del segnale **digitale/analogico** in trasmissione e **analogico/digitale** in ricezione, necessarie per trasmettere dati sul **local loop** a 3 kHz

**Codec:** effettua le trasformazioni **analogico/digitale** nella prima centralina di commutazione e **digitale/analogico** nell’ultima

Le trasmissioni sui **local loop** sono soggette ad **attenuazione e distorsione.**

Poiché l’ampio spettro di frequenze generato dalle onde quadre contrasta con la banda ridotta del local loop, **la trasmissione digitale sui local loop può avvenire solo a bassissime velocità.**

Per trasmettere un segnale digitale sul local loop, si modula un segnale sinusoidale, detto **portante**, la cui frequenza è compresa tra 1 e 2 kHz (la banda del local loop è di 3 kHz)

Un segnale può essere modulato in:

* **Ampiezza 🡪** si varia l’ampiezza
* **Frequenza 🡪** si varia la frequenza
* **Fase 🡪** si varia la fase (cioè lo scostamento rispetto al segnale originale)

Un ulteriore aumento delle prestazioni si può ottenere effettuando una **compressione dei dati** prima di trasmetterli.

Per la compressione dei dati, esistono due standard: **V.42 bis (de iure)** emesso da ITU e **MNP 5** emesso da Microom Network (**de facto)**

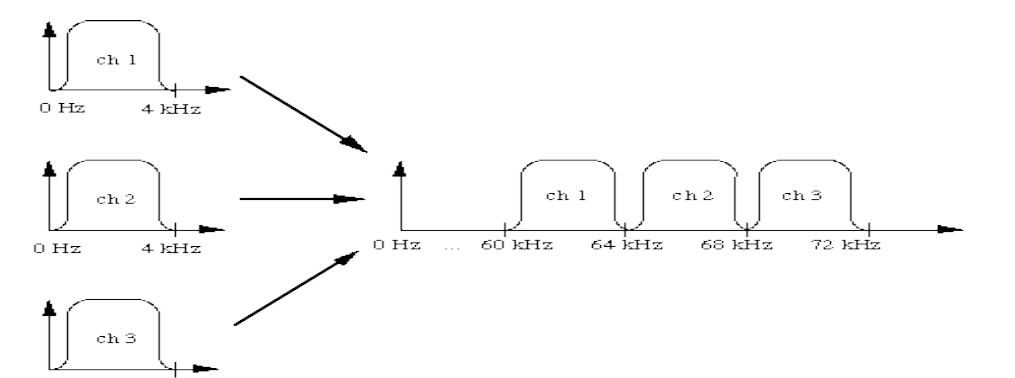
Maggiori velocità sono oggi possibili con nuove tecnlogie quali ISDN, ADSL, ATM…

I trunk trasmettono migliaia di informazioni simultaneamente.

La capacità di trasmettere migliaia di informazioni simultaneamente prende il nome di **multiplexing TDM e FDM.**

* **Frequency Division Multiplexing (FDM):** adatto alla gestione di segnali analogici

Lo spettro di frequenza è suddiviso in bande più piccole, e ogni comunicazione ha l’esclusivo uso di una di esse.



* **Time Division Multiplexing (TDM):** adatto per la gestione di dati in forma digitale.

i bit provenienti da diverse connessioni vengono a turno prelevati ed inviati su un'unica

connessione ad alta velocità:

Questa tecnica con il tempo si è confermata essere molto affidabile se non fosse per il fatto che l’ITU non riuscì a creare uno standard internazionale facendo sì che nel mondo venissero utilizzare una serie di modalità incompatibili tra di loro.

Nord America e Giappone usano la portante ***T1***, essa è composta da 24 canali vocali uniti in multiplexing, ognuno dei quali, a turno, inserisce 8 bit nel flusso in uscita.

Al di fuori del Nord America e Giappone, al posto della T1 viene usata la portante **E1**, composta da 32 canali (30 dati e 2 controllo) con valori ad 8 bit ogni 125 ms.

Con il passare degli anni, per creare collegamenti sempre più performanti si è deciso di:

• ***T2***: collegare 4 canali T1, ognuno dei quali garantiva 1.544 Mbps, per formare un unico canale che garantisse velocità di 6,312 Mbps (non 6,176 perché c’è l’aggiunta di bit di controllo).

• ***T3***: collegare 7 canali T2, ognuno dei quali garantiva 6,312 Mbps, per formare un unico canale che garantisse velocità di 44,736 Mbps.

• ***T4***: collegare 6 canali T3, ognuno dei quali garantiva 44,736 Mbps, per formare un unico canale che garantisse velocità di 274,176 Mbps.

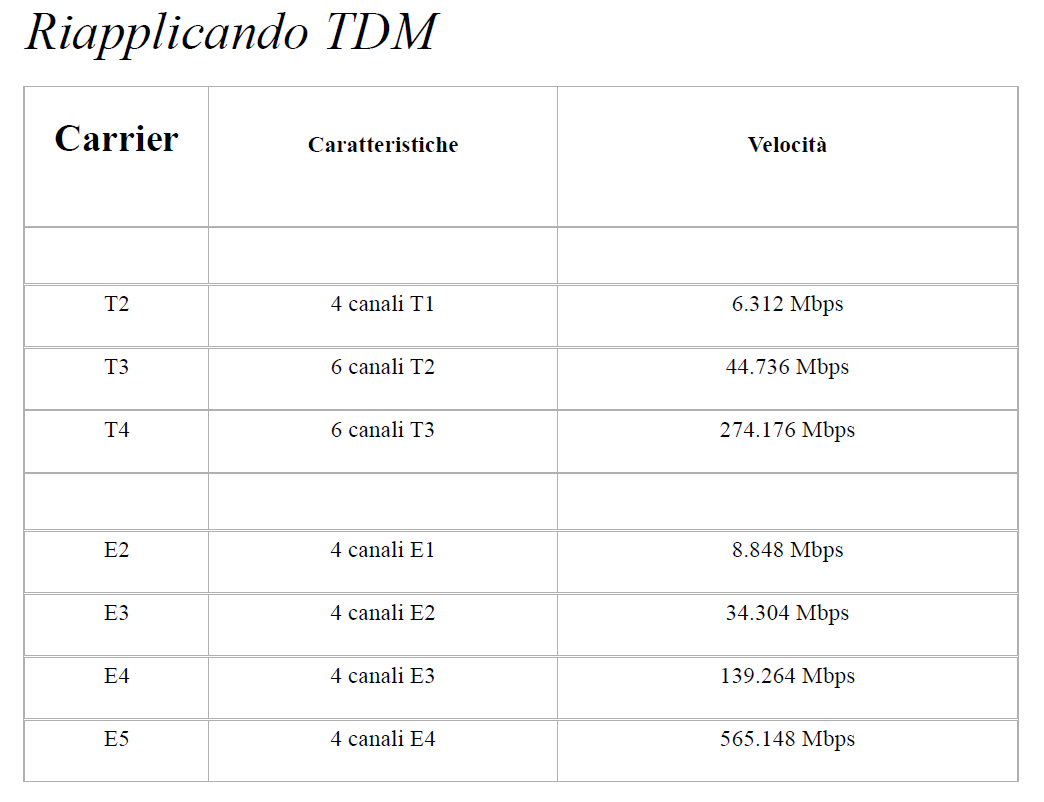
La differenza tra i sistemi richiede costose apparecchiature di conversione ai confini fra un l’uno

e l'altro.

* **SDH** (Synchronous Digital Hierarchy): gerarchia unificata a livello mondiale, introdotta dal CCITT

verso la metà degli anni '80.

* **SONET** (Synchronous Optical NETwork): nato negli USA, si basa sul canale STS-1 (810 byte ogni 125 μs: 51.84 Mbps) non presente in SDH.



Poiché IL **TDM** può essere usato solo nei segnali digitali e l’ultimo miglio (local loop) produce segnali analogici, è necessario fare una conversione nella centrale locale, dove i segnali vengono raggruppati per essere spediti lungo i **trunk**

I segnali analogici sono digitalizzati da un dispositivo chiamato **codec.** Il codec estrae 8000 campioni al secondo (uno ogni 125 ms) perché secondo il teorema di Nyquist sono sufficienti a catturare tutta l’informazione da un canale telefonico a 4 kHz. Ad un tasso di campionamento più basso l’informazione andrebbe persa, viceversa, non si otterrebbe alcuna informazione aggiuntiva.

Questa tecnica è chiamata **PCM** (**P**ulse **C**ode **M**odulation, modulazione codificata di impulsi) ed è il cuore dei sistemi telefonici moderni. Di conseguenza, quasi tutti gli intervalli di tempo all’interno di un sistema telefonico sono multipli di 125ms.

All’altro capo della linea il segnale verrà riconvertito in analogico dal codec anche se non sarà del tutto uguale a quello di partenza.

Finora abbiamo analizzato il sistema telefonico dal punto di vista dell’impianto esterno (ultimo miglio e i trunk), andiamo ora ad analizzare l’impianto interno, quello composto quindi dai commutatori. Attualmente le reti usano due tecniche di commutazione:

• ***Commutazione di circuito***: tecnica su cui si basa il sistema telefonico tradizionale, tale tecnica, concettualmente, quando una persona avvia una telefonata, l’apparecchiatura di commutazione cerca di creare un percorso fisico completo tra il chiamante ed il chiamato. Agli inizi della telefonia era l’operatore manualmente a creare questo percorso oggi ci sono dispositivi di commutazione automatica.

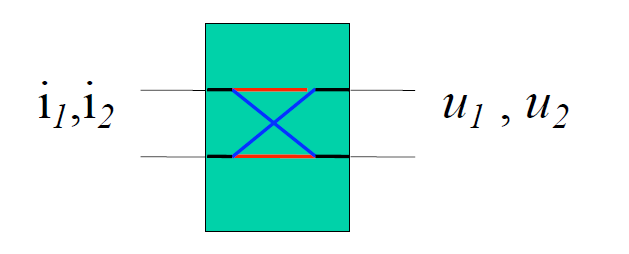
• ***Commutazione di pacchetto***: con questa tecnica la comunicazione tra i due utenti avviene mediante l’invio di pacchetti, questo fa si che si hanno notevoli benefici, tra cui, non avere la necessità di un percorso fisico dedicato, poiché ogni pacchetto segue una strada diversa, seguendo la disponibilità della banda dei percorsi disponibili, inoltre il pacchetto appena generato viene inviato, senza la necessità di creare prima un percorso. Di seguito vediamo le differenze principali tra le due tecniche.

I dispositivi di commutazione sono:

* **Switch**

dispositivo a semiconduttori con due ingressi (i1, i2), due uscite (u1, u2) e due possibili

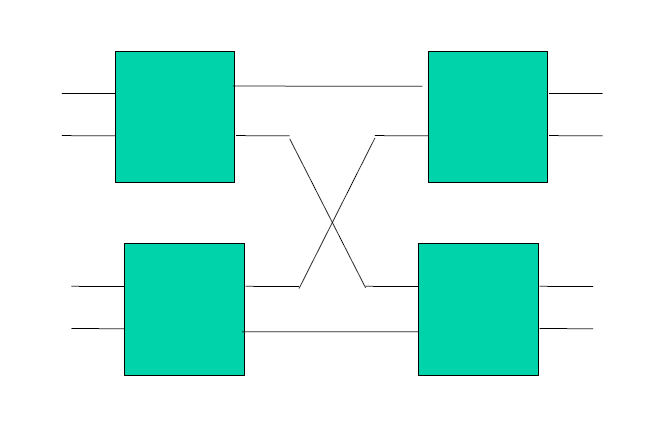
stati:



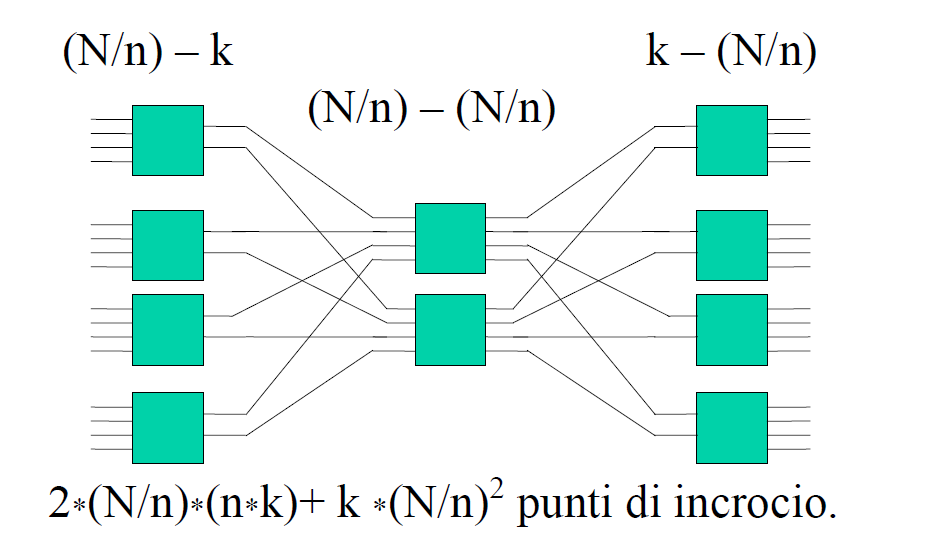
*i1* è connesso a *u1* e *i2* è connesso a *u2*;

*i1* è connesso a *u2* e *i2* è connesso a *u1*.

* **Crossbar**: N ingressi, N uscite ed N2 punti di incrocio, realizzati ciascuno con uno switch.



* **Switch multilivello**: (multistage switch): utilizzo di più crossbar di piccole dimensioni (ad es. 2\*2), organizzati in gruppi su più livelli successivi



# **LEZIONE 6-7-8-9 – IL LIVELLO DATA LINK**

## 6.1 Introduzione

Nel livello data link discuteremo degli algoritmi usai per ottenere una comunicazione affidabile ed efficiente tra unità d’informazione chiamate frame fra due macchine adiacenti, ovvero due macchine collegate da un canale di comunicazione che agisce concettualmente come un cavo.

## 6.2 Progettazione del livello Data Link

Il livello Data Link fa uso del servizio messo a disposizione dal livello fisico per inviare e ricevere bit su un canale di comunicazione.

Ha molte funzioni, tra cui:

* Fornire un’interfaccia di servizio ben definita per il livello tre
* Gestire gli errori di trasmissione
* Regolare il flusso dati in modo che i buffer dei dispositivi lenti non vengano inondati dai trasmittenti veloci

Il livello Data Link può essere progettato in modo da offrire una varietà di servizi che cambiano da protocollo a protocollo, come ad esempio:

* Servizio senza conferma (**unacknowledged**) senza connessione
* Servizio con conferma (**acknowledged)** senza connessione
* Servizio con conferma orientato alla connessione

Il servizio di tipo ***unacknowledged*** senza connessione consiste nell’avere una macchina sorgente che invia i frame senza preoccuparsi dell’arrivo effettivo di quest’ultimi.

In particolare, il destinatario non invierà al mittente una conferma.

Se un frame viene perso a causa del rumore sulla linea, non viene fatto alcun tentativo di rilevare la perdita o di correggerla nel livello data link. L’uso di questa classe di servizio è appropriato quando la frequenza degli errori di trasmissione è molto bassa oppure quando si deve utilizzare un traffico real-time, come la trasmissione vocale, per le quali gli effetti del ritardo sono peggiori di quelli derivanti dalla trasmissione di dati sbagliati.

Il servizio ***acknowledged*** senza connessione, continua a non utilizzare alcun tipo di connessione logica, però quando il ricevente riceve un frame, spedisce al mittente una conferma chiamata **acknowledgment (ACK).** In questo modo il mittente riesce a sapere se il frame è arrivato a destinazione in modo corretto oppure no. Se non è arrivato in uno specifico intervallo temporale, il frame può essere rispedito. Questa classe di servizio è utilizzata per i canali di trasmissione poco affidabili come ad esempio il WI-FI.

L’ACK è da considerarsi come un’ottimizzazione e mai come un requisito obbligatorio.

Il servizio ***acknowledged orientato alla connessione*** è un tipo di servizio dove il mittente e destinatario stabiliscono una connessione prima di iniziare a trasferire i dati.

Ogni frame trasferito è numerato e il livello data link garantisce che venga effettivamente ricevuto una sola volta e nell’ordine corretto, quindi si tratta di un servizio che consente il trasferimento affidabile di un flusso di bit.

E’ utilizzato per collegamenti lunghi e inaffidabili come i canali satellitari e linee telefoniche a lunga distanza.

Se, in queste situazioni, si utilizzasse semplicemente un servizio con ACK senza connessione, è possibile che i frame di ACK vadano persi e ciò causerebbe un re-invio di frame duplicati che andrebbe solamente a sprecare la banda del canale di comunicazione.

Con l’ack sorgono alcuni problemi:

**Un frame può anche sparire del tutto, per cui il mittente rimane bloccato in attesa di un ack che non arriverà mai** (Il mittente stabilisce un time-out per la ricezione dell'ack. Se questo non arriva in tempo, ritrasmette di nuovo il frame).

**Se sparisce l'ack, il destinatario può trovarsi due (o più) copie dello stesso frame** (Il mittente inserisce un numero di sequenza all'interno di ogni frame dati).

Un altro aspetto importante è il **controllo del flusso**.

Si invia un feedback dal destinatario al mittente per impedire che il mittente spedisca dati più velocemente di quanto il destinatario sia in grado di ricevere.

Meccanismi basati sull'esplicita autorizzazione:

**il destinatario informa il mittente riguardo il numero di frame che può ricevere.**

## 6.3 Operazioni del livello due

In trasmissione:

* suddivide il flusso di bit, che arriva dal livello tre, in una serie di frame;
* calcola una funzione (**checksum**) per ciascun frame;
* inserisce il checksum nel frame;
* consegna il frame al livello uno, il quale lo spedirà come sequenza di bit.

In ricezione:

* riceve una sequenza di bit dal livello uno;
* ricostruisce da essa un frame dopo l'altro;
* per ciascun frame ricalcola il checksum;
* se il checksum ricalcolato è diverso da quello contenuto nel frame, il frame viene scartato.

## 6.4 Suddivisione in frame

L’approccio del livello data link è quello di suddividere il flusso di bit in una serie discreta di frame, calcolare un valore a lunghezza fissa, chiamato **checksum**, per ogni frame e includere il checksum nel frame quando viene trasmesso. Quando un frame arriva a destinazione, il checksum viene ricalcolato e se differisce, il livello data link sa che c’è stato un errore e prende provvedimenti, per esempio scartando il frame o restituendo un messaggio di errore.

Suddividere il flusso di bit in frame è un’operazione che viene chiamata **framing** ed è possibile effettuarla attraverso 4 metodi:

* **Conteggio dei byte**
* **Flag byte con byte stuffing**
* **Flag bit con bit stuffing**
* **Violazioni della codifica del livello fisico**

Il metodo **conteggio dei byte** consiste nell’usare un campo nell’header per specificare il numero di byte del frame. Quando il livello data link della destinazione legge tale numero, sa quanti byte seguiranno e quindi dove si troverà la fine del frame.

Tuttavia questo metodo non è efficiente, poiché l’informazione viaggia nel frame che è soggetto a rumore e quindi il valore contenuto nell’header potrebbe cambiare, ottenendo letture di frame inconsistenti.

Il secondo metodo chiamato **Flag byte con byte stuffing** consiste nell’inserire byte speciali all’inizio e alla fine di ogni frame. La maggior parte dei protocolli utilizza un byte speciale che prende il nome di **flag byte (DLE – Data Link Escape)**, per delimitare sia l’inizio che la fine dei frame.

Quindi, due flag byte consecutivi indicano la fine e l’inizio di un frame.

**DLE STX** (Start of TeXt): inizio frame.

**DLE ETX** (End of TeXt): fine frame.

Questo metodo presenta tuttavia un problema, in quanto può accadere che nella trasmissione dati compaia naturalmente il flag byte, specialmente in quelli binari, quali immagini, video, audio ecc, interferendo così con le operazioni di framing.

La soluzione è quella di inserire un byte di escape (**un altro DLE)** subito prima di ogni occorrenza nei dati.

Il livello data link di destinazione provvederà a rimuovere i byte di escape prima di passarli e livello rete. Questa tecnica è chiamata **byte stuffing**

Il terzo metodo aggira il limite imposto dal byte stuffing di usare byte ad 8 bit. L’operazione di framing può essere effettuata anche a livello di bit in modo che i frame possano contenere un numero arbitrario di bit.

Ad esempio, ogni volta che si incontrano 5 bit **consecutivi** ad 1, si inserisce uno 0 aggiuntivo per delimitare il frame.

Anche in questo caso è presente lo stuffing.

L’ultimo metodo sfrutta il concetto che il livello fisico per conservare l’integrità dei dati inserisce ridondanza, quindi nell’invio di 4 bit di dati spesso si usano pacchetti da 5 bit, tenendo così 16 delle 32 combinazioni libere, questa tecnica usa proprio quelle combinazioni libere per inserire l’inizio e la fine del frame.

## 6.5 Rilevazione e correzione degli errori

Molti fattori possono provocare errori, soprattutto sul local loop e nelle trasmissioni wireless (mentre sono piuttosto rari nei mezzi più moderni quali le fibre ottiche).

Gli errori sono dovuti in generale a **rumore di fondo**, **disturbi improvvisi** (ad es. fulmini), **interferenze** (ad es. motori elettrici).

Per trattare questi errori il livello data link aggiunge informazione ridondanti ai dati che devono essere spediti.

Una strategia consiste nell’includere informazioni ridondanti in un numero sufficiente da permettere al destinatario di dedurre i dati realmente trasmessi, l’altra consiste nell’introdurre una ridondanza di informazioni per permettere al destinatario di dedurre che c’è stato un errore (ma non quale).

La prima strategia usa **codici a correzione d’errore** (*error-correction code*), l’altra utilizza **codici a rilevazione d’errore** (*error-detecting code).* L’uso di codici a correzione d’errore viene spesso indicato come **FEC** (*forward error correction – correzione d’errore in anticipo)*

## 6.6 Codici a correzione di errore

Tra i codici a correzione d’errore troviamo il **codice di Hamming**.

Un frame (a parte i delimitatori) sarà composto di

**m = n + r** bit dove **m = bit del messaggio vero e proprio, r = redundant bit o check bit 🡪 bit per il controllo dell’errore.**

Per introdurre il codice di Hamming è importante stabilire cos’è la **distanza di Hamming.**

La **distanza di Hamming** è semplicemente il numero di bit in cui differiscono due configurazioni binarie.

Chiameremo ognuna di queste configurazioni **Codeword (parola codice 🡪 sequenza di m+r bit)** e l’insieme di tutte le configurazioni **Codice (code 🡪 insieme prefissato di codeword)**

Nell’ambito tecnico, tale distanza è calcolata attraverso un’operazione bitwise (bit a bit) di OR esclusivo (**XOR)** e poi si contano i bit ad 1 di tale sequenza.

**Es:** D(**1**00**0**1 . **0**000**1**1) = 2

Quando consideriamo l’insieme di tutte le codeword, quindi il codice, possiamo stabilire il concetto di **distanza minima di Hamming** di un codice, ovvero la minor distanza considerando due sue parole qualsiasi.

La distanza tra le parole di un codice gioca un ruolo fondamentale nel meccanismo di rilevazione degli errori. Un codice più è ridondante e più è efficace per rilevare errori. Se un codice non è ridondante, non ci sono possibilità di rilevazione degli errori.

ES: Supponiamo di avere la seguente codifica:

A 000

B 001

C 010

D 011

E 100

F 101

G 110

H 111

Se vogliamo inviare A 🡪 000 , ma arriva B 🡪 001 , quindi c’è stato un errore sul singolo bit finale, **il ricevente non è in grado di rilevare se c’è stato un errore poiché la sequenza 001 è una codeword valida.**

Se invece intervallassimo le parole codice come nel seguente caso:

A 000

001

010

100

B 011

111

101

110

C ….

Qualunque bit corrotto in una codifica valida porterebbe ad un errore poiché la distanza di Hamming di questo codice è 2.

In generale, un codice per la rilevazione di modifiche **su** **d bit,** deve avere almeno

**DMIN = d+1.**

Di conseguenza se ho un codice con **DMIN=2**, sarò in grado di rilevare errori sul singolo bit e così via.

I codici di questo tipo sono detti **SEDC (Single Error Detection Code)** ed hanno tutti **DMIN** almeno pari a 2.

Hamming, ha dato anche un ulteriore apporto per poter, non solo rilevare l’errore, ma anche individuare dove è presente l’errore e correggerlo.

Questo avviene aggiungendo un numero di bit sufficienti di parità e ciascun bit di parità sarà la parità di alcuni bit e l’algoritmo sarà in grado di determinare anche se un bit di parità si è sporcato.

E’ importante notare che il numero di bit di controllo va scelto secondo la seguente formula:

Dove **r** sono i bit di controllo ed **m** i bit del messaggio originale.

Dato un messaggio M da inviare, il procedimento da applicare per ottenere il frame MS effettivamente trasmesso, consiste nel sistemare i bit su di una griglia di 12 posizioni, dove le posizioni in cui l'indice è potenza di 2 sono occupate dai bit di controllo, mentre tutte le altre

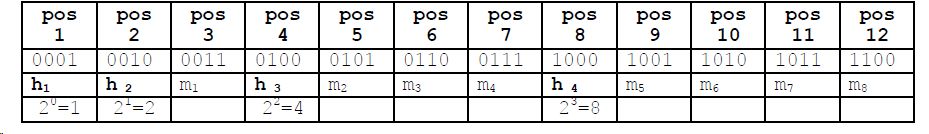
ospitano ordinatamente i bit del messaggio M.

Sia M = 10110110

con:

m1 = 1 m2 = 0 m3 = 1 m4 = 1 m5 = 0 m6 = 1 m7 = 1 m8 = 0

La stringa da trasmettere sarà la seguente:



Osservando la figura si può notare che per ogni byte da spedire il codice di Hammnig utilizza 4 bit di controllo: **h1 h2 h3 h4** nelle posizioni 1,2, 4 e 8; il codice è quindi completato dai bit del messaggio.

Nella seconda riga della stessa figura sono mostrati i valori binari delle posizioni occupabili dai bit; si noti che tutte le posizioni occupate dai bit controllori hanno un solo 1 in tale valore binario, mentre tutte le posizioni occupate dai bit controllati, i bit del messaggio, hanno almeno due 1.

Vediamo ora come si determinano i valori dei bit di controllo.

Il bit h1 si trova in posizione 1 (valore binario 000**1**) della stringa del codice Hamming. **Esso controlla tutti i bit che nel valore binario della posizione occupata hanno un 1 in quarta posizione incominciando da sinistra**, ovvero:

h1 controlla:

m1, posizione 001**1**

m2, posizione 010**1**

m4, posizione 011**1**

m5, posizione 100**1**

m7, posizione 101**1**

Il bit h2 si trova in posizione 2 (valore binario 00**1**0) della stringa del codice Hamming. **Esso controlla tutti i bit che nel valore binario della posizione occupata hanno un 1 in terza posizione incominciando da sinistra**, ovvero:

h2 controlla

m1, posizione 00**1**1

m3, posizione 01**1**0

m4, posizione 01**1**1

m6, posizione 10**1**0

m7, posizione 10**1**1

Il bit h3 si trova in posizione 4 (valore binario 0**1**00) della stringa del codice Hamming. **Esso controlla tutti i bit che nel valore binario della posizione occupata hanno un 1 in seconda posizione incominciando da sinistra**, ovvero:

h3 controlla

m2, posizione 0**1**01

m3, posizione 0**1**10

m4, posizione 0**1**11

m8, posizione 1**1**00

Il bit h4 si trova in posizione 8 (valore binario **1**000) della stringa del codice Hamming. **Esso controlla tutti i bit che nel valore binario della posizione occupata hanno un 1 in prima posizione incominciando da sinistra**, ovvero:

h4 controlla m5, posizione **1**001

m6, posizione **1**010

m7, posizione **1**011

m8, posizione **1**100

Nel codice così costruito ogni bit del messaggio da spedire, M, è controllato dal almeno due bit di controllo.

**I valori dei bit di controllo si ottengono mediante un’operazione di XOR tra tutti i bit controllati**, per cui avremo che:

h1 = m1 ⊕m2 ⊕m4 ⊕m5 ⊕m7 = 1 ⊕0 ⊕1 ⊕0 ⊕1 = 1

h2 = m1 ⊕m3 ⊕m4 ⊕m6 ⊕m7 = 1 ⊕1 ⊕1 ⊕1 ⊕1 = 1

h3 = m2 ⊕m3 ⊕m4 ⊕m8 = 0 ⊕1 ⊕1 ⊕0 = 0

h4 = m5 ⊕m6 ⊕m7 ⊕m8 = 0 ⊕1 ⊕1 ⊕0 = 0

Si ricava, quindi, il seguente codice Hamming:

MS = **11**1**0**011**0**0110

dove in neretto sono individuati i bit di controllo.

L’entità che riceve il frame verifica la sua bontà **mediante un controllo che si basa sull’XOR tra tutti i bit controllati con il proprio bit controllore determinando le somme Si**, così come mostrato negli esempi che seguono. Dal valore delle somme Si dipende la correttezza del messaggio; i casi possibili sono due; ovvero:

1. messaggio corretto 🡪 tutti gli Si sono uguali a 0;

2. messaggio errato 🡪 esiste almeno un Si uguale a 1. In tal caso i valori delle quattro somme S4S3S2S1 indicano la posizione del bit errato.

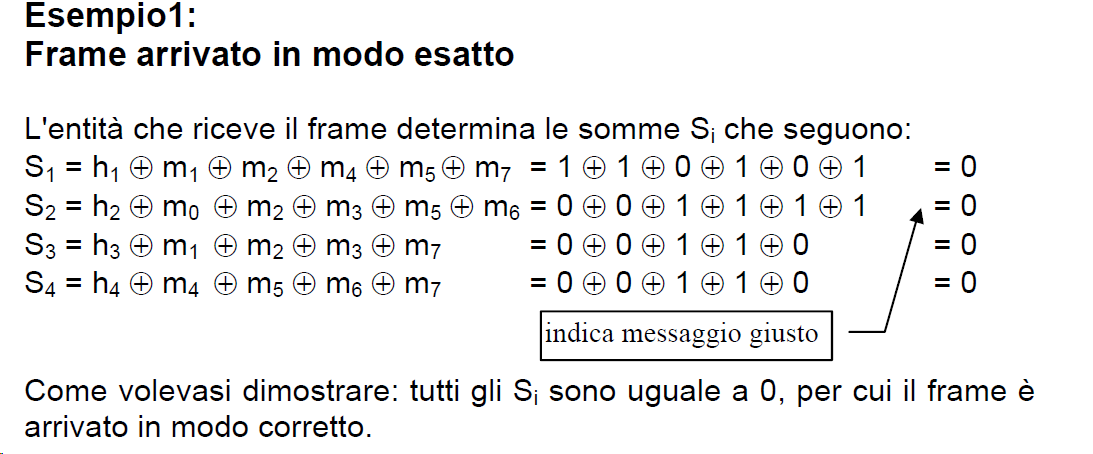
Allo scopo vediamo tre esempi in cui si verificano i seguenti eventi:

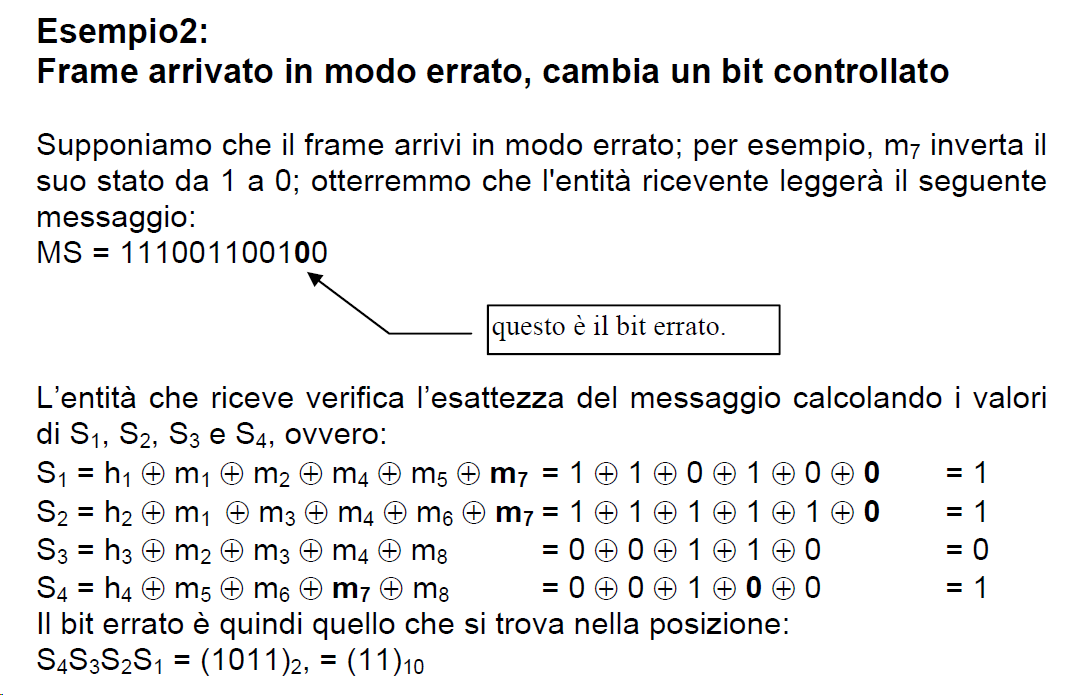
1. frame arrivato in modo esatto;

2. frame arrivato in modo errato perché è cambiato un bit del messaggio

(bit controllato);

3: frame arrivato in modo errato perché è cambiato un bit controllore.







I codici correttori di errore, ad eccezione delle trasmissioni simplex dove non è possibile inviare al mittente una richiesta di ritrasmissione, sono usati molto raramente.

E’ più efficiente limitarsi a rilevare gli errori, e ritrasmettere saltuariamente i dati errati, piuttosto che impiegare un codice (più dispendioso in termini di ridondanza) per la correzione degli errori.

## 6.7 Codici a rilevazione d’errore

Tra i codici a rilevazione d’errore troviamo:

* **Bit di parità**
* **Checksum**
* **CRC (Cyclic Redundant Check)**

Il **bit di parità** viene scelto in modo che il numero di 1 nella parola di codice sia dispari (o pari). Questa operazione equivale a calcolare il bit di parità (disparità) come somma modulo 2 o lo **XOR** dei bit di dati. Per esempio, se viene inviata la sequenza 1011010 in parità dispari, viene aggiunto un bit ad 1 per ottenere 10110101 in modo che il numero di bit a 1 sia dispari. Un codice con un singolo bit di parità ha distanza pari a 2 ed è in grado di rilevare errori sul singolo bit poiché se ci fossero errori su 2 bit si otterrebbe una codeword valida.

Il **checksum** è spesso usato per indicare un gruppo di bit di controllo associati al messaggio, qualunque sia il modo di calcolarli. Un gruppo di bit di parità è un checksum, tuttavia esistono metodi per calcolare il checksum basati sulla somma progressiva di gruppi di bit del messaggio.

Il checksum verrà posizionato alla fine del messaggio (frame).

Il ricevente eseguirà la stessa operazione di somma e confronterà il risultato.

Se il risultato è identico al checksum, non ci saranno errori nella trasmissione.

Se cambiano 2 bit di un byte, il controllo di parità non se ne accorgerebbe (dist di hamming 2) , mentre il checksum si e quindi, a differenza di hamming, è impiegabile anche per errori di tipo **burst.**

Il checksum viene utilizzato anche nel protocollo IP.

Il **CRC** è il più potente codice a rilevazione d’errore ed è noto anche come ***codifica polinomiale.***

Le codifiche polinomiali si basano sul fatto di trattare sequenze di bit come dei polinomi a coefficienti che possono assumere solo i valori 0 ed 1 naturalmente.

Un frame di *k* bit viene visto come un polinomio con *k* coefficienti che variano da

a di grado *k-1.*

L’aritmetica è gestita in modulo 2. Non ci sono riporti per le addizioni o prestiti per le sottrazioni. Sia l’addizione che la sottrazione sono identiche all’ OR esclusivo.

Quando si utilizza una codifica polinomiale, sorgente e destinazione devono mettersi d’accordo in anticipo su un cosiddetto **polinomio generatore G(x).** Il generatore deve avere i bit di ordine più alto e basso uguali ad 1.

Per poter calcolare il **checksum** di un frame di m bit corrispondente al polinomio M(x) (**dividendo)**, il frame deve essere più lungo del polinomio generatore **(divisore).** L’idea è quella di aggiungere un checksum alla fine del frame in modo che il polinomio rappresentato dal frame + checksum sia divisibile per **G(x).** Quando la destinazione riceve il frame con checksum prova a dividerlo per G(x). Se c’è resto vuol dire che c’è stato un errore di trasmissione.

I passi per calcolare il checksum sono i seguenti:

1. Sia r il grado di G(x), si aggiungano r bit con valore 0 dopo la parte di ordine più basso al polinomio M(x) in modo da contenere m+r bit
2. Si divida tale sequenza per la sequenza corrispondente a G(x) usando la divisione modulo 2
3. Si sottragga il resto (che può contenere al più r bit) dalla sequenza corrispondente di M(x) m+r bit. Il risultato è il frame con checksum pronto per la trasmissione.

**In ogni divisione, se si sottrare il resto dal dividendo, quello che resta è sempre divisibile per il divisore.**

## 6.8 Comunicazione ed ACK

Nei livelli fisico, data link e network, ci sono processi (HW o SW) indipendenti, che comunicano fra loro, ad esempio scambiandosi messaggi;

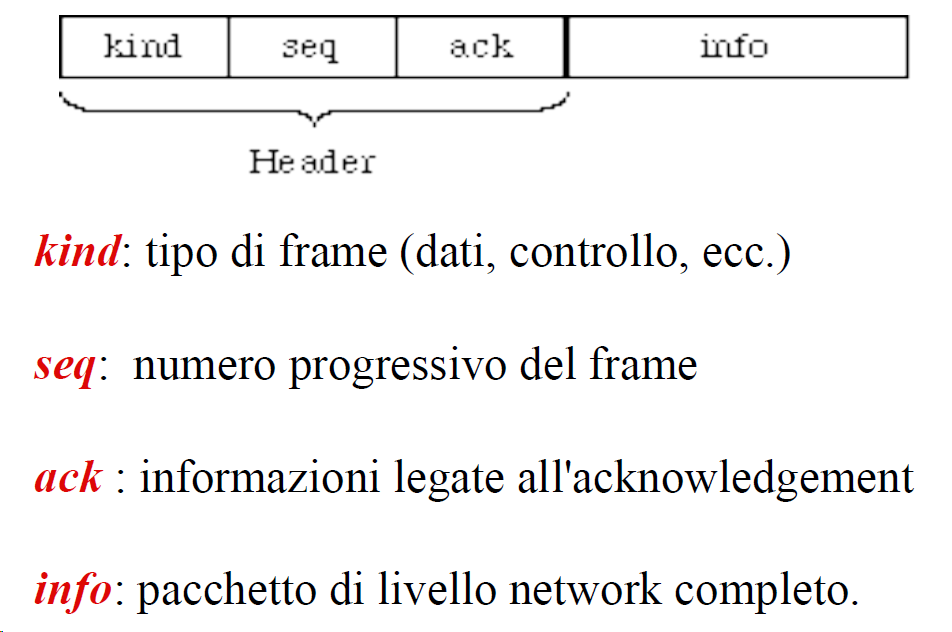
Quando il SW del livello data link riceve un pacchetto dal livello network, lo incapsula tra un **header** ed un **trailer**, calcola (con un apposito HW del livello data link) il **checksum** e i **delimitatori** ed infine passa il frame al livello sottostante, che trasmette il tutto.

All’inizio della trasmissione la destinazione non ha niente da fare, deve solamente aspettare che succeda qualcosa. Per cui il livello data link aspetta che accada qualcosa con la chiamata ad una procedura *wait\_for\_event(&event)* che termina solo quando è successo qualcosa.

Quando un frame arriva alla destinazione, l’HW calcola il checksum. Se il checksum non è corretto, il livello data ilnk viene informato (*event = cksum\_err).* Se il frame è arrivato senza problemi il SW del livello datalink è altresì informato (*event = frame\_arrival)* e lo acquisisce dal livello sottostante.

Successivamente ispeziona le informazioni di controllo contenute nell’header/trailer e, se tutto va bene, passa la parte informativa (dati) al livello di rete. In nessuna circostanza viene passato l’header di un frame al livello di rete. Questo accade per mantenere separati i protocolli data link e di rete. Se il livello di rete non conosce alcun dettaglio implementativo del protocollo data link o del formato dei frame, questi ultimi possono essere cambiati senza che ci sia anche una modifica nel livello di rete.

## 6.9 Struttura di un frame



## 6.10 Gestione di sequenza di trasmissione e flusso

### 6.10.1 Protocollo Heaven

Questo protocollo, per canale simplex (i frame viaggiano **in una sola direzione**), è molto semplice ed è basato sulle ipotesi (**non realistiche**) che:

* I frame dati vengono trasmessi in una sola direzione;
* Le peer entity di livello network sono sempre pronte (non devono mai attendere per inviare o ricevere al/dal livello data link);
* Si ignora il tempo di elaborazione del livello data link (**tempo nullo)**;
* C'è spazio infinito per il buffering nel ricevitore;
* Il canale fisico non fa mai errori.

Il protocollo consiste di due procedure, relative rispettivamente al mittente e al destinatario.

**Mittente** (loop infinito):

1. Attende un pacchetto dal livello network;
2. Costruisce un frame dati;
3. Passa il frame al livello fisico;
4. Torna ad 1).

**Destinatario** (loop infinito):

1. Attende l’arrivo di un frame da livello fisico;
2. Estrae il pacchetto;
3. Lo passa al livello network;
4. Torna ad 1).

### 6.10.2 Protocollo Stop and Wait

Rilasciamo l'ipotesi (poco realistica) che esista un buffer infinito nel ricevitore. Tutte le altre rimangono. La novità è che il mittente deve essere opportunamente rallentato. Ciò però non si può fare con ritardi prefissati: sarebbe troppo gravoso, perché questi dovrebbero essere calibrati sul caso pessimo, che non sempre si verificherà.

La soluzione consiste nell'invio, da parte del destinatario, di una esplicita autorizzazione all'invio del prossimo frame. Questo tipo di protocolli, nei quali il mittente attende un OK dal destinatario, si chiamano **stop and wait** su un canale almeno half-duplex.

il mittente invia il prossimo frame solo se esplicitamente autorizzato dal destinatario.

**Mittente** (loop infinito):

1. Attende l’arrivo di un pacchetto dal livello network;
2. Costruisce un frame dati;
3. Passa il frame al livello fisico;
4. Attende l’ack (ok);
5. Torna ad 1.

**Destinatario** (loop infinito):

1. Attende l’arrivo di un frame dati da livello fisico:
2. Estrae il pacchetto;
3. Consegna il pacchetto al livello network;
4. Invia un frame di ack al mittente;
5. Torna ad 1.

Assumiamo ora che il canale possa fare errori. I frame (dati o di ack) possono essere danneggiati o persi completamente. Se un frame arriva danneggiato, l'HW di controllo del checksum se ne accorge e informa il SW di livello data link; se il frame si perde del tutto, ovviamente, la cosa non si rileva.

Una possibile soluzione è la seguente:

* **mittente:** quando invia un frame dati, fa anche partire un timer. Alla scadenza del timer se l'ack per il frame trasmesso non è ancora arrivato, reinvia il frame.
* **destinatario:** per ogni frame dati arrivato senza errori invia un ack.

Questo semplice schema in realtà non basta, infatti può verificarsi la seguente sequenza di eventi:

1. Il frame dati x arriva bene;
2. L'ack del frame x si perde completamente (gli errori non discriminano tra frame dati e frame di ack);
3. Il frame dati x viene inviato di nuovo e arriva bene;
4. Il livello network di destinazione riceve due copie di x, errore!

E' necessario che il destinatario possa riconoscere gli eventuali doppioni. Ciò si ottiene sfruttando il campo **seq** **dell'header**, dove il mittente mette il numero di sequenza del frame dati inviato.

Notiamo che basta un bit per il numero di sequenza, poiché l'unica ambiguità in ricezione è tra un frame ed il suo immediato successore (**siamo ancora in stop and wait**): infatti, fino a che un frame non viene confermato, è sempre lui ad essere ritrasmesso, altrimenti è il suo successore.

Dunque, sia mittente che destinatario useranno, come valori per i numeri di sequenza, la successione ...01010101...

Il mittente trasmette i frame dati alternando zero ed uno nel campo **seq** e passa a trasmettere il prossimo frame **solo quando riceve l'ack di quello precedente**.

Il destinatario invia un frame di ack per tutti quelli ricevuti senza errori, **ma passa al livello network solo quelli con il numero di sequenza atteso**.

Per quanto riguarda le possibilità che i frame dati arrivino rovinati o non arrivino affatto, un meccanismo basato su timer va bene, bisogna però che esso sia regolato in modo da permettere sicuramente l'arrivo dell'ack, pena la ritrasmissione errata di un duplicato del frame, che può creare grossi guai.

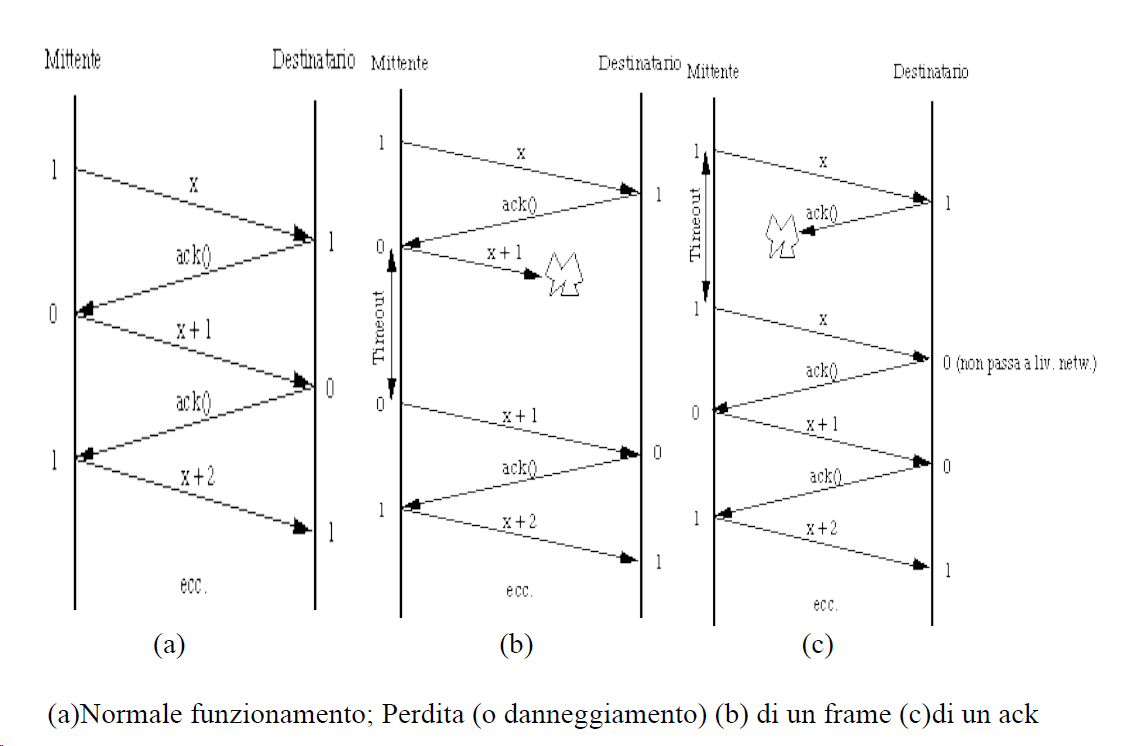
Protocolli come questo, in cui il mittente aspetta un ack di conferma prima di trasmettere il prossimo frame, si chiamano **PAR** (Positive Ack with Retransmission) o **ARQ** (Automatic Repeat Request).

**Mittente** (loop infinito; [seq] rappresenta il campo seq di un frame):

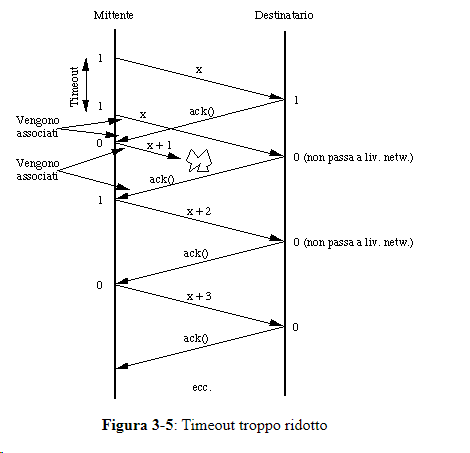
|  |
| --- |
| 0) n\_seq = 0;  1) n\_seq = 1 - n\_seq;  2) attende un pacchetto dal livello network;  3) costruisce frame dati e copia n\_seq in [seq];  4) passa il frame dati al livello fisico;  5) resetta il timer;  6) attende un evento:  \* timer scaduto: torna a 4)  \* arriva frame di ack (vuoto) non valido: torna a 4)  \* arriva frame di ack (vuoto) valido: torna ad 1) |

**Destinatario** (loop infinito; [seq] rappresenta il campo seq di un frame):

|  |
| --- |
| 0) n\_exp = 1;  1) attende evento;  \* arriva frame dati valido da livello fisico:  2) se ([seq] == n\_exp)  2.1) estrae pacchetto  2.2) lo consegna al livello network  2.3) n\_exp = 1 - n\_exp  3) invia frame di ack (vuoto)  4) torna ad 1)  \* arriva frame non valido: torna ad 1) |



Un problema importante è legato, come abbiamo già accennato, alla lunghezza del timeout. Se esso è troppo breve, può succedere questo:

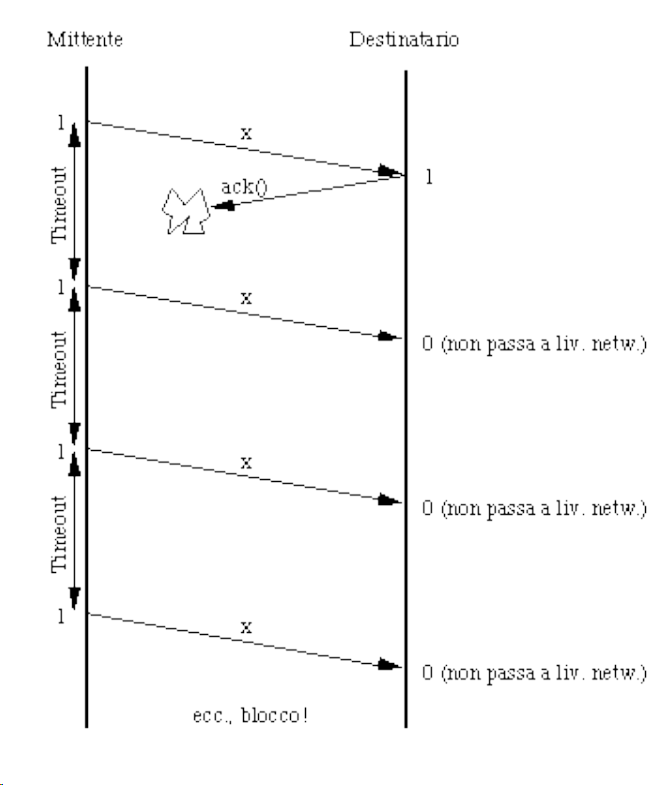


Se (x+1) si perde, l’ack inviato per la seconda copia di x potrebbe essere scambiato per l’ack di x+1) e quindi non ci si accorgerebbe che quest’ultimo è perso.

Ovviamente (x+2), sebbene ricevuto regolarmente non sarà passato al livello rete perché il numero di sequenza non è corretto, e quindi (x+2) viene scambiato per una copia di x.

Ovviamente il problema non lo si risolve se si invia l’Ack per i soli frame non duplicati.

Infatti la perdita di ack causerebbe un blocco dal lato mittente che non ricevendo l’ack continuerebbe ad inviare ininterrottamente il frame per il quale non avrebbe mai riscontro.



### 6.10.3 Protocolli a finestra scorrevole

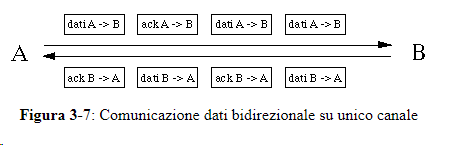
#### 6.10.3.1 Preambolo

Nei casi precedenti i frame dati viaggiano in una sola direzione e i frame di ack nella direzione contraria, quindi esistono dei frame che viaggiano in entrambe le direzioni.

Dunque, volendo stabilire una comunicazione dati bidirezionale è necessario disporre di due circuiti, il che ovviamente è uno spreco di risorse. Un'idea migliore è usare un solo circuito, nel quale far convivere tutte le esigenze.

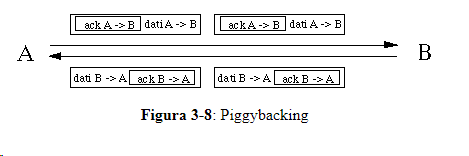
Supponendo che la comunicazione sia fra A e B, si avrà che:

* nella direzione da A a B viaggiano i frame dati inviati da A a B e i frame di ack inviati da A a B (in risposta ai frame dati inviati da B ad A);
* nella direzione da B a A viaggiano i frame dati inviati da B a A e i frame di ack inviati da B a A (in risposta ai frame dati inviati da A a B);
* il campo **kind** serve a distinguere fra i due tipi di frame, dati e di ack, che viaggiano nella stessa direzione.



Una miglioria può essere effettuata utilizzando la tecnica del **Piggybacking** cioè:

**quando B deve inviare un ack ad A, lo inserisce (in un apposito campo) nel prossimo frame dati che B deve inviare ad A.**



Il campo ack serve proprio a questo scopo, infatti è il campo in cui viene trasportato, se c'è, un ack.

Questa tecnica consente un notevole risparmio di:

* **banda utilizzata**;
* **uso di cpu.**

Infatti, con questa tecnica le informazioni di ack non richiedono la costruzione di un apposito frame (e quindi il tempo necessario alla creazione ed al riempimento della struttura, al calcolo del checksum, ecc.) né la sua trasmissione (e quindi l'uso di banda).

Tuttavia, non è possibile aspettare l’ack all’infinito. Mittente e Destinatario stabiliscono un tempo di attesa limite, trascorso il quale si crea un apposito frame di ack.

I protocolli che vedremo ora appartengono alla classe dei protocolli sliding window (finestra scorrevole), sono **full-duplex** (per i dati), sfruttano il **piggybacking** e sono più robusti di quelli precedenti.

Differiscono fra loro per efficienza, complessità e capacità dei buffer. Alcuni aspetti però **sono comuni** a tutti gli algoritmi:

Operazioni del **mittente**:

1. Ogni frame inviato ha un numero di sequenza, da 0 a (il campo seq è costituito da n bit);
2. Ad ogni istante il mittente mantiene una **finestra scorrevole** **sugli indici dei frame**, e **solo quelli entro la finestra possono essere trasmessi**. I numeri di sequenza entro la finestra rappresentano frame da spedire o spediti, ma non ancora confermati:
   1. quando arriva dal livello network un pacchetto, un nuovo indice **entra** nella finestra;
   2. quando arriva un ack, il corrispondente indice **esce** dalla finestra;
   3. i frame dentro la finestra devono essere mantenuti in memoria per la possibile ritrasmissione; se il buffer è pieno, il livello data link deve costringere il livello network a sospendere la consegna di pacchetti;

Analogamente, il **destinatario**:

1. Mantiene una finestra corrispondente agli indici dei frame che possono essere accettati:
   1. se arriva un frame il cui indice è fuori dalla finestra, il frame viene scartato (e non si invia il relativo ack);
   2. se arriva un frame il cui indice è dentro la finestra, il frame viene accettato; viene spedito il relativo ack; la finestra viene spostata in avanti;

Si noti che la finestra del destinatario rimane sempre della stessa dimensione, e se essa è pari a 1 il livello accetta i frame solo nell'ordine giusto altrimenti uscirebbero fuori dalla finestra (ma per dimensioni maggiori di 1 questo non è più detto).

Le finestre di mittente e destinatario non devono necessariamente avere uguali dimensioni, né uguali limiti inferiori o superiori.



In questi protocolli il livello data link ha più libertà nell'ordine di trasmissione, fermo restando che:

* i pacchetti devono essere riconsegnati al livello network nello stesso ordine di partenza;
* il canale fisico è **wire-like**, cioé consegna i frame nell'ordine di partenza.

#### 6.10.3.2 Protocolli a finestra scorrevole di un bit

In questo protocollo sia mittente che destinatario usano una finestra scorrevole di dimensione uno. Di fatto questo è un protocollo stop-and-wait.

Non c'è differenza di comportamento fra mittente e destinatario, entrambi usano lo stesso codice (questo vale anche per i protocolli successivi).

Il funzionamento, molto semplice, è il seguente:

* il **mittente**, quando invia un frame, fa partire un timer:
  + se prima che scada il timer arriva un ack con lo stesso numero di sequenza del frame che si sta cercando di trasmettere, si avanza la finestra e si passa a trasmettere il frame successivo;
  + se arriva un ack diverso o scade il timer, si ritrasmette il frame;
* il **destinatario** invece:
  + quando arriva un frame corretto, senza errori, invia un ack col corrispondente numero di sequenza;
  + se il frame non è un duplicato lo passa al livello network e avanza la finestra.

Qui sta la principale novità rispetto al protocollo stop and wait: l'ack è etichettato col numero di sequenza del frame a cui si riferisce. I valori dell'etichetta possono solo essere 0 e 1, come nel protocollo stop and wait.

Il peggio che può succedere è la ritrasmissione inutile di qualche frame, ma questo protocollo è sicuro.

### 6.10.4 Protocolli go-back-n e selective repeat

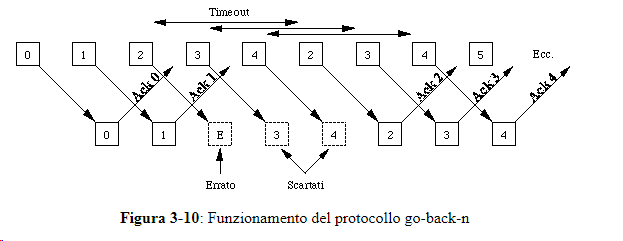
Se il tempo di andata e ritorno del segnale (**round-trip time**) è alto, come ad esempio nel caso dei canali satellitari nei quali è tipicamente pari a 500 + 500 msec, c'è un enorme inefficienza coi protocolli stop-and-wait, perché si sta quasi sempre fermi aspettando l'ack.

Per migliorare le cose, si può consentire l'invio di un certo numero di frame anche senza aver ricevuto l'ack del primo. Questa tecnica va sotto il nome di **pipelining**.

Ciò però pone un serio problema, perché se un frame nel mezzo della sequenza subisce alterazioni, il mittente invia molti altri frame prima di riceverne notizia.

Il primo approccio al problema è quello del protocollo **go-back-n**:

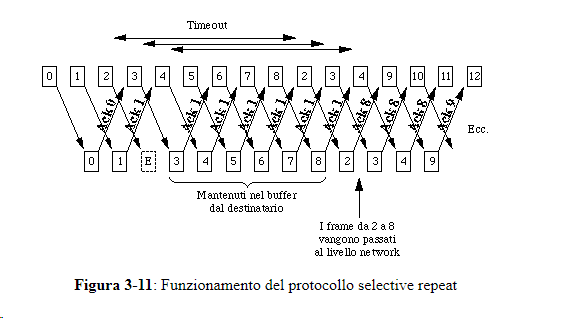
* Se arriva un frame danneggiato o con un numero di sequenza non progressivo, il destinatario **ignora** tale frame e tutti i successivi, non inviando i relativi ack. Ciò corrisponde ad una finestra di dimensione uno nel ricevitore, che quindi accetta i frame solo nell'ordine giusto;
* **il mittente ad un certo punto va in time-out sul frame sbagliato, e poi su tutti quelli successivi (scartati dal destinatario),** e quindi provvede a ritrasmettere la sequenza di frame che inizia con quello per il quale si è verificato il time-out.



Si noti che il mittente deve mantenere in un apposito buffer tutti i frame non confermati per poterli eventualmente ritrasmettere. Se il buffer si riempie, il mittente deve bloccare il livello network fino a che non si ricrea dello spazio. Inoltre, **vi è spreco di banda se il tasso d'errore è alto e/o il time-out è lungo**

Il secondo approccio è più efficiente, ed è chiamato **selective repeat**:

* **il destinatario mantiene nel suo buffer tutti i frame ricevuti successivamente ad un eventuale frame rovinato; non appena questo arriva nuovamente (senza errori), esso e tutti i successivi frame contigui che il destinatario ha mantenuto nel buffer vengono consegnati al livello network;**
* per ogni frame arrivato bene, il destinatario invia un ack col numero più alto della sequenza completa arrivata fino a quel momento;
* quando si verifica un timeout, il mittente rispedisce il frame corrispondente.



Considerazioni sul **selective repeat**:

* mittente e destinatario devono entrambi gestire un buffer per mantenervi i frame:
  + non confermati (mittente);
  + successivi ad un errore (destinatario);
* vi è un basso spreco di banda, che si si può ulteriormente diminuire mandando un **NACK** (Negative ACKnowledgement) quando:
  + arriva un frame danneggiato;
  + arriva un frame diverso da quello atteso (ciò può indicare l'avvenuta perdita del frame precedente).

Infine, si noti che per entrambi i precedenti protocolli:

* è necessaria la gestione di **timer multipli** (uno per ogni frame inviato e non confermato);
* il ricevente, per inviare gli ack, usa il **piggybacking** se possibile, altrimenti invia un apposito frame.

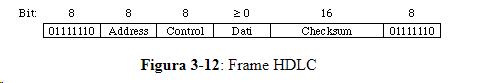
## 6.11 Protocolli del livello Data Link

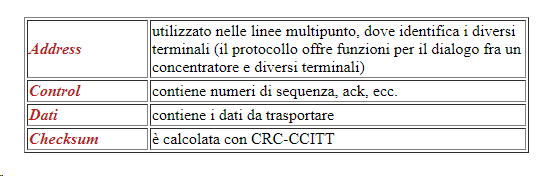
I protocolli data link più diffusi oggi sono discendenti del protocollo ***SDLC*** (***Synchronous Data Link Control***), nato nell'ambito dell'architettura SNA. Nel seguito verranno illustrate brevemente le caratteristiche di tre diffusi protocolli: ***HDLC*** (standard ISO), ***SLIP*** (architettura TCP/IP) e ***PPP*** (suo successore).

### 6.11.1 HDLC

**HDLC** è un protocollo **bit oriented**, e quindi usa la tecnica del **bit stuffing**.

Il formato del frame HDLC è illustrato nella figura seguente.





**Caratteristiche:**

* usa una finestra scorrevole con numeri di sequenza a 3 bit, contenuti dentro un campo ***Seq*** situato all'interno del campo Control;
* utilizza il campo ***Next***, anch'esso contenuto in Control, per il piggybacking degli ack;
* ha tre tipi di frame (identificati dai primi due bit di Control):
  + ***Information***, per la trasmissione dati;
  + ***Supervisory***, per comandare diverse modalità di ritrasmissione;
  + ***Unnumbered*** (non ha il numero di sequenza), per finalità di controllo o per trasportare il traffico di connessioni non affidabili.

### 6.11.2 SLIP

E' nato nel 1984 ed è il più vecchio protocollo di livello data link dell'Internet Protocol Suite.

Molto semplice, nacque per collegare via modem macchine Sun ad Internet. Usa **character stuffing**.

Ha diverse limitazioni:

* non c'è controllo degli errori;
* supporta solo IP, e per di più solo indirizzi statici;
* non è uno standard ufficiale di Internet.

### 6.11.3 PPP

E’ adatto sia a connessioni telefoniche che a linee router-router.

Fornisce le seguenti funzionalità:

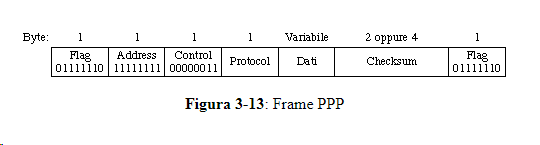
* **framing**;
* **rilevamento degli errori**;
* un protocollo di controllo per attivare, testare e disattivare la linea (***LCP, Link Control Protocol***, RFC [1570](http://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/rfc/rfc1570.txt));
* supporto di molteplici protocolli di livello network;
* una famiglia di protocolli per negoziare opzioni di livello network (***NCP, Network Control Protocol***):
  + per ogni livello network supportato c'è un differente NCP;
  + ad esempio, nel caso di IP, NCP viene usato per negoziare un indirizzo IP dinamico;

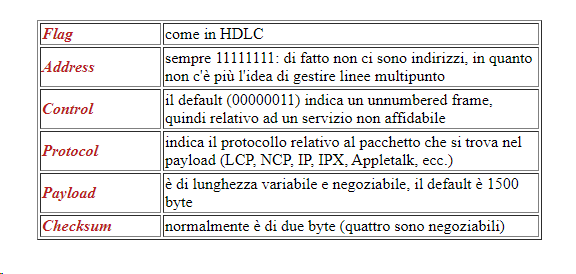
Il traffico derivante (nelle fasi iniziali e finali della connessione) dall'uso dei protocolli LCP e NCP viene trasportato dentro i frame PPP.

Il protocollo è modellato su HDLC, ma con alcune differenze:

* è character-oriented anziché bit-oriented, e utilizza il character stuffing (quindi i frame sono costituiti da un numero intero di byte);
* c'è un campo apposito per il supporto multiprotocollo offerto al livello network.

Il formato del frame PPP è il seguente.





## 6.12 Il sottolivello MAC (Medium Access Control)

Come già chiarito, le reti sono divise in due categorie: ***punto a punto*** e ***broadcast***.

Nelle reti broadcast il problema principale è decidere quale elaboratore (detto anche ***stazione***) ha diritto di usare il mezzo trasmissivo quando c'è competizione. Si deve evitare che molte stazioni trasmettano contemporaneamente, perché i relativi segnali si disturberebbero a vicenda.

I protocolli per decidere chi è il prossimo a trasmettere su un canale broadcast (detto anche ***multiaccess channel*** o ***random access channel***) appartengono ad un sottolivello del livello data link, detto ***sottolivello MAC***.

Essi sono usati soprattutto nelle LAN, ma anche nelle parti di WAN basate su satelliti.

Il problema principale è come allocare il canale ai vari utenti in competizione. Ci sono due meccanismi fondamentali:

* ***allocazione statica***, che viene decisa in anticipo;
* ***allocazione dinamica***, che si adatta alle esigenze di ogni momento.

**L'allocazione statica** prevede la suddivisione del canale fra gli N utenti, ciascuno dei quali riceve di conseguenza una frazione della banda totale. Si può fare, ad esempio, con tecniche quali FDM, allocando a ciascun utente una banda di frequenze distinta da quella degli altri utenti. Ciò va bene se il numero di utenti non varia rapidamente e se tutti trasmettono con un data rate più o meno costante, però in genere comporta vari problemi (svantaggi):

* si verifica uno spreco di banda quando uno o più utenti non trasmettono;
* poiché il traffico è in generale molto ***bursty***, i picchi che si verificano non possono essere gestiti solamente con la sotto-banda allocata.

Viceversa, **l'allocazione dinamica** cerca di adeguarsi alle esigenze trasmissive, in modo da soddisfarle al meglio. Ci sono alcune assunzioni da fare:

1. ***modello a stazioni***: ci sono N stazioni indipendenti, ognuna delle quali genera nuovi frame per la trasmissione. La probabilità di generare un frame in un intervallo di tempo T è uguale a pT, dove p è una costante e rappresenta il tasso d'arrivo dei nuovi frame. Quando un frame è generato, la stazione si blocca finché esso non è trasmesso;
2. ***singolo canale***: un singolo canale, e null'altro, è disponibile per le comunicazioni; tutte le stazioni vi possono trasmettere e da esso possono ricevere, e tutte sono ad uguale livello;
3. ***collisioni***: se due frame vengono trasmessi contemporaneamente, si sovrappongono ed il segnale risultante è rovinato (si verifica collisione):
   * tutte le stazioni possono rilevare la collisione;
   * i frame devono essere ritrasmessi;
   * non ci sono altri tipi di errori;
4. ***tempo***: può essere gestito in due modi:
   * ***continuous time***: la trasmissione di un frame può iniziare in un qualunque istante;
   * ***slotted time***: il tempo è diviso in intervalli discreti (***slot***). Uno slot può contenere 0, 1 oppure più di un frame. Ciò corrisponde ad uno slot vuoto, ad uno slot con un frame e ad uno slot in cui si verifica una collisione. La trasmissione può iniziare solo all'inizio di uno slot;
5. ***ascolto del canale***: ci sono due possibilità,
   * ***carrier sense*** (tipico delle LAN): le stazioni, prima di trasmettere, ascoltano il canale; se è occupato non cercano di trasmettere;
   * ***no carrier sense*** (tipico dei canali via satellite, nei quali vi è un elevato round trip time): le stazioni non ascoltano, trasmettono senz'altro; si preoccuperanno dopo di vedere se c'è stata una collisione.

### 6.12.1 Protocollo ALOHA

Nacque negli anni '70 per collegare tra loro, tramite radio al suolo, gli elaboratori sparsi nelle isole Hawaii.

Esistono due versioni, ***Pure Aloha*** e ***Slotted Aloha***.

Nel ***Pure Aloha*** le stazioni trasmettono quando vogliono, però durante la trasmissione ascoltano il canale e confrontano ciò che ricevono con ciò che hanno spedito.

Dunque, se si verifica una collisione se ne accorgono, e in tal caso, dopo aver lasciato passare una quantità di tempo casuale, ritrasmettono il frame. La scelta di attendere per una quantità di tempo casuale discende dal fatto che altrimenti una collisione ne ricrea infinite altre.

Efficienza dello schema Aloha puro:

Definiamo come ***frame time*** il tempo necessario alla trasmissione di un frame, che ha lunghezza fissa. Supponiamo che vengano complessivamente generati dei frame con una distribuzione di Poisson avente media di S frame per frame time.

Ovviamente, se S >= 1, ci saranno quasi sempre collisioni. Per un throughput ragionevole ci aspettiamo 0 < S < 1.

Purtroppo, oltre ai frame nuovi, ci sono anche quelli relativi alla ritrasmissione causata da collisioni precedenti.

Supponiamo che la distribuzione di tutti i frame (vecchi e nuovi) sia anch'essa di Poisson, con valor medio pari a G frame per frame time.

A basso carico ci aspettiamo poche collisioni, quindi G è circa uguale ad S. Ad alto carico invece avremo più collisioni, per cui G sarà maggiore di S.

In ogni caso, sotto qualunque condizione di carico il ***throughput*** (cioé la ***quantità di pacchetti che arrivano a destinazione***) è uguale al carico offerto moltiplicato per la probabilità che la trasmissione abbia successo, ossia:

**Throughput = G\*P(0)**

dove P(0) è la probabilità che un frame non soffra collisioni.

Per calcolare il throughput effettivo, e quindi l'efficienza, ottenibile col protocollo Pure Aloha, si devono fare due considerazioni.

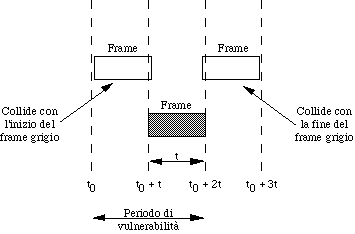
La prima è che la probabilità di generare k frame durante un intervallo di tempo pari ad un frame time è data, per la distribuzione di Poisson sopra definita (avente, si ricordi, valor medio pari a G frame per frame time) dalla relazione:

http://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/Cap4a/Image1.gif

Dunque, la probabilità che si generino zero frame in un intervallo di tempo pari ad un frame time è pari a

**P(0) = e-G**.

La seconda considerazione è che il ***periodo di vulnerabilità*** di un frame, cioé l'intervallo di tempo nel quale esso è a rischio di collisioni, è lungo 2 volte il frame time.



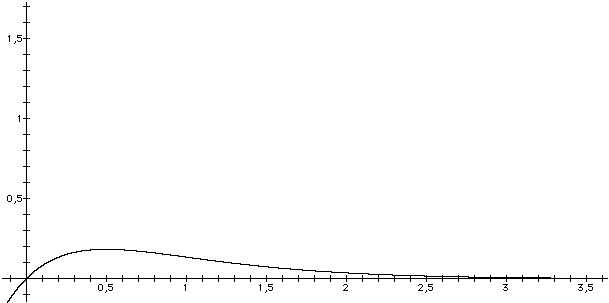
In tale periodo vengono generati mediamente 2G frame. Di conseguenza, la probabilità che non si generino nuovi frame per tutto il periodo di vulnerabilità di un frame è:

**P(0) = e-2G**

Utilizzando tale probabilità nella relazione vista sopra per il throughput, otteniamo la stima del throughput raggiungibile col protocollo Pure Aloha, che è

**Throughput = Ge-2G**

ed ha la seguente forma:



l massimo throughput è 0,184, cioé meno del 20% (due frame su 10 slot) in corrispondenza di un carico G pari a 0,5 frame per frame time.

Un modo per aumentare l'efficienza di Aloha (Roberts, 1972) consiste nel dividere il tempo in intervalli discreti, ciascuno corrispondente ad un frame time. Ovviamente gli utenti devono essere d'accordo nel confine fra gli intervalli, e ciò può essere fatto facendo emettere da una attrezzatura speciale un breve segnale all'inizio di ogni intervallo.

Le stazioni non possono iniziare a trasmettere quando vogliono, ma solo all'inizio dell'intervallo.

Questo protocollo, che prende il nome di Slotted Aloha, dimezza il periodo di vulnerabilità che diviene uguale ad un solo frame time.

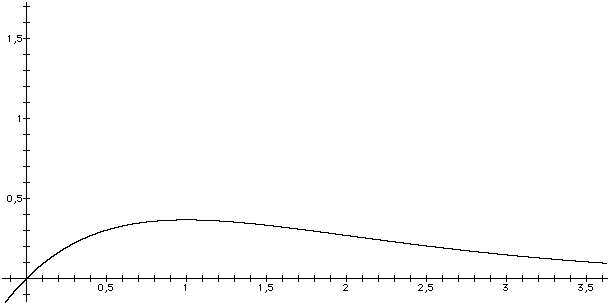
In tale periodo vengono generati mediamente G frame, per cui la probabilità che non si generino nuovi frame per tutto il periodo di vulnerabilità di un frame è:

**P(0) = e-G**

Utilizzando tale probabilità nella relazione vista precedentemente per il throughput, otteniamo la stima del throughput ragggiungibile col protocollo Slotted Aloha, che è:

**Throughput = Ge-G**

ed ha la seguente forma:



### 6.12.2 Protocolli CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

Nelle reti locali le stazioni possono ascoltare il canale e regolarsi di conseguenza, ottenendo un'efficienza molto più alta. I protocolli nei quali le stazioni ascoltano il canale prima di iniziare a trasmettere si dicono ***carrier sense***.

Ci sono vari tipi di protocolli carrier sense:

* ***1-persistent***
  + Quando una stazione deve trasmettere, ascolta il canale:
    - se è occupato, aspetta finché si libera e quindi trasmette;
    - se è libero, trasmette (con probabilità 1, da cui il nome).
  + Se avviene una collisione, la stazione aspetta un tempo random e riprova tutto da capo.
  + Problemi:
    - una stazione A trasmette, e prima che il suo segnale arrivi a B anche B inizia a trasmette, dunque si verifica una collisione. Più alto è il tempo di propagazione fra A e B e più grave è il fenomeno;
    - A e B ascoltano contemporaneamente durante la trasmissione di C, e non appena quest'ultima termina iniziano entrambe a trasmettere: anche in questo caso si verifica una collisione.
* ***Nonpersistent***
  + Quando una stazione deve trasmettere, ascolta il canale:
    - se è occupato, invece di trasmettere non appena si libera come in 1-persistent la stazione aspetta comunque un tempo random e ripete tutto il procedimento da capo;
    - se è libero, si comporta come in 1-persistent.
  + Intuitivamente, ci si aspettano maggiori ritardi prima di riuscire a trasmettere un frame e meno collisioni rispetto a 1-persistent.
* ***P-persistent*** (si applica a canali slotted)
  + Quando una stazione deve trasmettere, ascolta il canale:
    - se è occupato, aspetta il prossimo slot e ricomincia da capo;
    - se è libero:
      * con probabilità p trasmette subito;
      * con probabilità 1 - p aspetta il prossimo slot; se anch'esso è libero, riapplica tale procedimento;
  + Il processo si ripete finché:
    - il frame è trasmesso, oppure qualcun altro ha iniziato a trasmettere. In questo caso la stazione si comporta come in una collisione: aspetta un tempo random e ricomincia da capo.
  + Intuitivamente, al diminuire di p ci si aspettano crescenti ritardi prima di riuscire a trasmettere un frame ed una progressiva diminuzione delle collisioni.

### 6.12.3 Protocolli CSMA/CD (CSMA with Collision Detection)

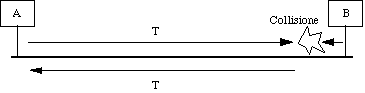
Un ulteriore miglioramento si ha se le stazioni interrompono la loro trasmissione non appena rilevano una collisione, invece di portarla a termine.

Rilevare la collisione è un processo analogico: si ascolta il canale durante la propria trasmissione, e se la potenza del segnale ricevuto è superiore a quella trasmessa si scopre la collisione.

Quando si verifica una collisione, la stazione aspetta una quantità casuale di tempo e riprova a trasmettere.

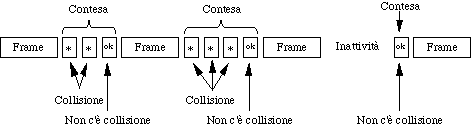
Posto uguale a T il tempo di propagazione del segnale da un capo all'altro della rete, è necessario che trascorra un tempo pari a 2T perché una stazione possa essere sicura di rilevare una collisione.

Infatti, se una stazione A posta ad una estremità della rete inizia a trasmettere al tempo t0, il suo segnale arriva a B (posta all'altra estremità della rete) dopo al tempo t0 + T; se un attimo prima di tale istante anche B inizia a trasmettere, la collisione conseguente viene rilevata da B quasi immediatamente, ma impiega una ulteriore quantità T di tempo per giungere ad A, che la può quindi rilevare solo un attimo prima dell'istante t0 + 2T.



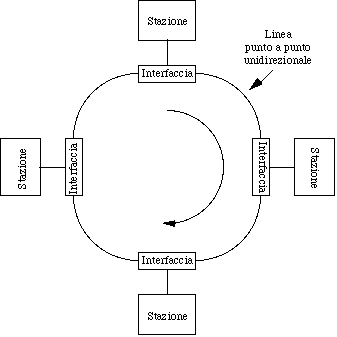
Il modello concettuale che si utilizza è il seguente:

* vi è un'alternanza di periodi di ***contesa***, di ***trasmissione*** e di ***inattività***;
* il periodo di contesa è modellato come uno Slotted Aloha con slot di durata 2T: a titolo di esempio, per un cavo di 1 km T vale circa 5 microsecondi.



### 6.12.4 Le reti ad anello

Una ***rete ad anello*** consiste di una collezione di interfacce di rete, collegate a coppie da linee punto a punto:

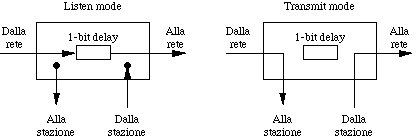


Le reti ad anello hanno diverse attrattive:

* non sono reti basate su un mezzo trasmissivo broadcast;
* non c'è una significativa componente analogica per la rilevazione delle collisioni (che non possono verificarsi);
* l'anello è intrinsecamente equo.

Ogni bit che arriva all'interfaccia è copiato in un buffer interno, poi rigenerato e ritrasmesso sul ring. Può essere modificato prima di essere ritrasmesso.

L'interfaccia di rete può operare in due diverse modalità, ***listen mode*** e ***transmit mode***:



**In listen mode** i bit in ingresso vengono copiati nel buffer interno (dove possono essere anche modificati) e quindi ritrasmessi con un ritardo di un bit (***1-bit delay***).

**In transmit mode** l'anello è aperto, e i bit in arrivo vengono rimossi; nuovi bit vengono trasmessi sull'anello.

Una speciale configurazione binaria, detta ***token*** (***gettone***) circola in continuazione se nessuno vuole trasmettere.

Quando una stazione vuole trasmettere, deve:

1. aspettare che arrivi il token (in listen mode);
2. rimuoverlo dal ring (in listen mode, vedremo come);
3. trasmettere i dati (in transmit mode);
4. rigenerare il token (in transmit mode);
5. rimettersi in listen mode.

Poiché c'è un solo token, questo meccanismo risolve senza conflitti il problema dell'accesso al mezzo.

***T***ime ***H***olding ***T***oken (***THT***): *tempo massimo entro il quale, una volta preso il token, si deve completare la trasmissione (schedulazione round-robin delle trasmissioni).*

Alcune considerazioni sono degne di nota:

* il token deve essere contenuto per intero sull'anello, il che non è così ovvio come sembra
* un frame, invece, non è necessario che ci stia tutto sull'anello (che in trasmissione è aperto), quindi non ci sono limiti alla dimensione dei frame;
* in genere esiste un tempo massimo entro il quale, una volta preso il token, si deve completare la trasmissione; ciò permette di ottenere una schedulazione round-robin delle trasmissioni;
* quando tutte le stazioni hanno qualcosa da trasmettere, l'efficienza si avvicina al 100%;
* viceversa, quando non c'è traffico, una stazione deve attendere un pò più che in CSMA/CD per trasmettere (mediamente dovrà attendere un tempo pari a quello di attraversamento di mezzo anello, per ricevere il token).

La velocità di propagazione del segnale nel rame è circa 200 metri per microsecondo. Con un data rate (ad esempio) di 1 Mbps, si genera un bit al microsecondo. Dunque, un bit è lungo in tal caso circa 200 metri, per cui per contenere 10 bit un anello dovrebbe essere lungo almeno 2 km.

In realtà sul ring trovano posto:

* x bit sull'anello, in funzione della sua lunghezza totale;
* y bit nei buffer delle interfacce delle y stazioni presenti (1 bit delay).

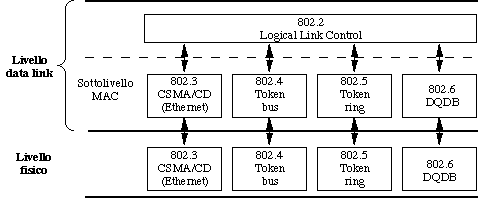
In definitiva, è necessario che x + y sia maggiore del numero di bit del token. Ciò significa che, a seconda delle caratteristiche dimensionali della rete in questione, può essere necessario ricavare un ritardo addizionale, sotto forma di buffer aggiuntivi, in una stazione (che ha un ruolo particolare, quello di ***monitor dell'anello***).

## 6.13 Lo standard 802

IEEE ha prodotto diversi standard per le LAN, collettivamente noti come ***IEEE 802***. Essi includono gli standard per:

* ***Specifiche generali*** del progetto (802.1);
* ***Logical Link Control, LLC*** (802.2);
* ***CSMA/CD*** (802.3);
* ***token bus*** (802.4, destinato a LAN per automazione industriale);
* ***token ring*** (802.5);
* ***DQDB*** (802.6, destinato alle MAN).

I vari standard differiscono a livello fisico e nel sottolivello MAC, ma sono compatibili a livello data link. Ciò è ottenuto separando dal resto, attraverso l'apposito standard LLC, la parte superiore del livello data link, che viene usata da tutti i protocolli standard del gruppo.



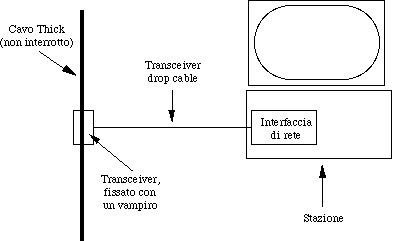
### 6.13.1 IEEE 802.3

E' lo standard per un protocollo CSMA/CD, di tipo 1-persistent, funzionante a 10Mbps. 802.3 è l'evoluzione dello standard ***Ethernet***, proposto da Xerox, DEC e INTEL sulla base dell'esperienza maturata con Aloha prima e nei laboratori Xerox PARC poi.

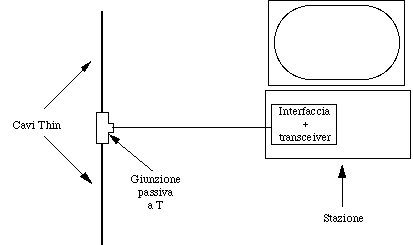
802.3 e Ethernet hanno alcune differenze, ma sono largamente compatibili.

Sono previsti vari cablaggi:

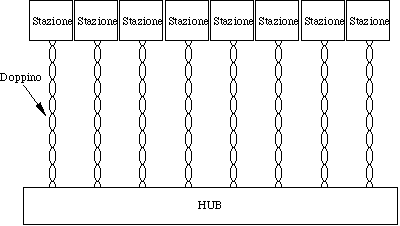
* ***Thick ethernet***: è il primo storicamente; consiste di un cavo coassiale spesso (lo standard suggerisce il colore giallo per la guaina esterna).
  + Ufficialmente si chiama ***10Base5***, ossia:
    - 10 Mbps;
    - Baseband signaling;
    - 500 metri di lunghezza massima.
  + Possono essere installate 100 macchine su un segmento.
  + Ogni stazione contiene un'***interfaccia di rete*** (detta anche ***scheda ethernet***) che:
    - incapsula i dati del livello superiore;
    - gestisce il protocollo MAC;
    - codifica i dati da trasmettere;
    - in ricezione decapsula i dati, e li consegna al livello superiore (o lo informa dell'errore).
  + All'interfaccia di rete viene collegata una estremità di un corto cavo (pochi metri), detto ***transceiver drop cable***, all'altra estremità del quale è connesso un ***transceiver*** che si aggancia, con un dispositivo detto ***vampiro***, al cavo thick (che non viene interrotto).
  + Il transceiver contiene la circuiteria analogica per l'ascolto del canale e la rilevazione delle collisioni. Quando c'è una collisione, il transceiver informa l'interfaccia ed invia sulla rete uno speciale segnale di 32 bit (***jamming sequence***) per avvisare le altre stazioni, che così scartano quanto già ricevuto.



* ***Thin ethernet***: è un cavo coassiale più sottile, e si piega più facilmente.
  + Ufficialmente si chiama ***10Base2***, ossia:
    - 10 Mbps;
    - Baseband signaling;
    - 200 metri di lunghezza massima per un singolo segmento.
  + Possono essere installate 30 macchine su un segmento.
  + Di norma l'interfaccia di rete contiene anche il transceiver.
  + L'allaccio di una stazione alla rete avviene con una giunzione a T, alla quale sono collegati il cavo che porta alla stazione e due cavi thin che costituiscono una porzione del segmento. Le varie stazioni sono collegate in cascata (***daisy-chain***) sul segmento.



* **Doppino telefonico**:
  + Lo standard ***10BaseT*** (twisted) prevede il collegamento fra una sola coppia di stazioni.
  + La lunghezza massima è 100 metri (150 se il doppino è di classe 5).
  + Per connettere più di due stazioni serve un ***ripetitore multiporta*** (detto ***HUB***).



Un ripetitore è un dispositivo che opera a livello uno (fisico): riceve il segnale da un

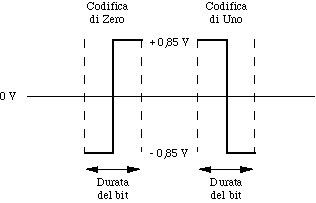
segmento, lo amplifica e lo ritrasmette su tutti gli altri segmenti. I ripetitori possono essere usati anche per aumentare la lunghezza complessiva della rete.

Comunque, sono in vigore delle regole generali stabilite dallo standard:

* la lunghezza massima dell'intera rete, fra qualunque coppia di stazioni, non deve superare i 2,5 km;
* fra qualunque coppia di stazioni non devono trovarsi più di quattro ripetitori;
* possono esservi al massimo 1024 stazioni sulla rete.

In 802.3 non si usa una codifica diretta dei dati (ad esempio, zero volt per lo zero e cinque volt per l'uno), perché sarebbe difficile rilevare le collisioni. Inoltre, si vuole delimitare con facilità l'inizio e la fine di ogni singolo bit.

Si usa una codifica, detta ***Manchester***, che prevede una transizione del valore del segnale nel mezzo di ogni bit, zero o uno che sia.

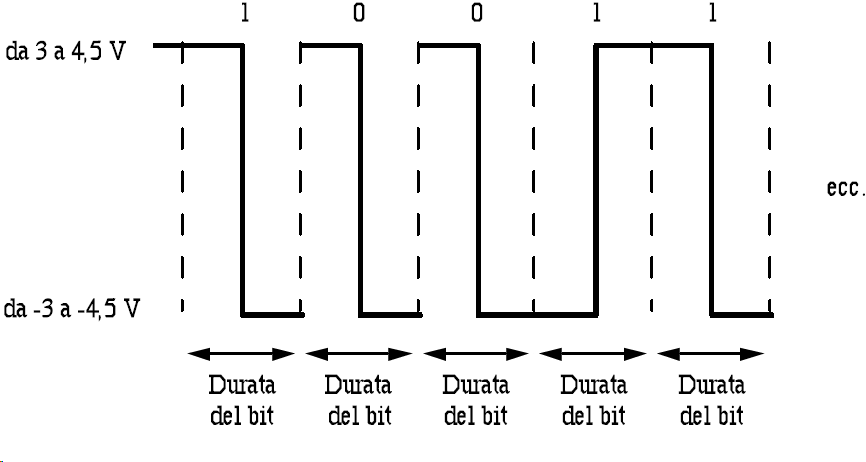


***Differential Manchester Encoding***:

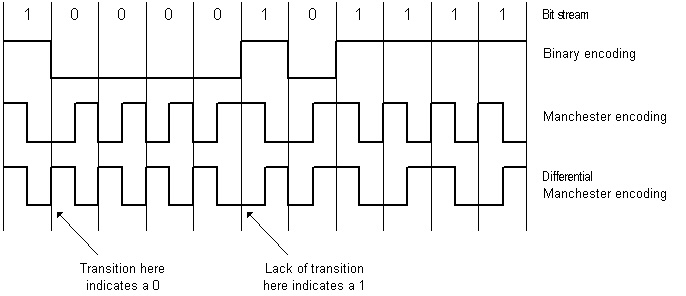
**0**: transizione all'inizio del bit;

**1**: non c’è transizione all'inizio del bit;

**0**, **1**: c’è transizione a metà del bit



Data Link Bit Encoding



Nei modelli ***Carrier Sensitive,*** che fanno uso della codifica ***Manchester,*** l’assenza di portante può essere codificata con segnale nullo

Fra i vantaggi di tale codifica:

* facilità di sincronizzazione fra mittente e destinatario;
* il codice trasmissivo è ***bilanciato***, cioé vi è uguale energia per lo zero e per l'uno, e quindi la trasmissione di dati, anche se genera diverse quantità di zeri e uni, non produce componenti in corrente continua, molto dannose perché ostacolano la trasmissione dei segnali;
* è facile rilevare le collisioni.

Si noti però che tale codifica richiede, a parità di velocità di trasmissione, una banda doppia rispetto alla codifica diretta (ogni bit richiede la trasmissione di due valori distinti).

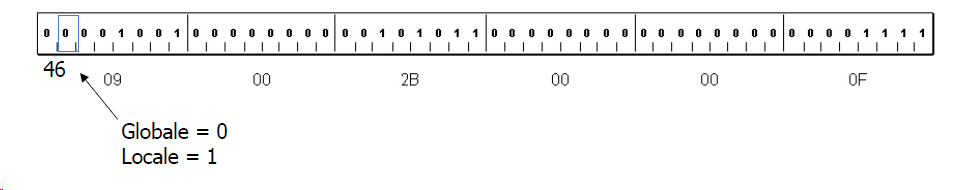
**La struttura di un frame 802.3 è la seguente:**

http://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/Cap4b/Image6.gif

I campi del frame hanno le seguenti funzioni:

|  |  |
| --- | --- |
| ***Preamble*** | 7 byte tutti uguali a 10101010. Producono, a 10 Mbps, un'onda quadra a 10 Mhz per 5,6 microsecondi, che consente al ricevitore di sincronizzare il suo clock con quello del trasmettitore. |
| ***Start of frame*** | un byte delimitatore, uguale a 10101011. |
| ***Indirizzi*** | gli indirizzi usati sono sempre a 6 byte, e sono univoci a livello mondiale (sono cablati dentro l'interfaccia). Il bit 47 (Individual, Group) definisce se il frame è indirizzato ad una singola stazione (unicast) o a un gruppo di stazioni (multicast).  Un indirizzo composto da tutti 1 è riservato per il broadcast (il frame è  ricevuto da tutte le stazioni) |
| ***Lunghezza dei dati*** | indica quanti byte ci sono nel campo dati (da 0 a 1500). |
| ***Dati*** | contiene il payload del livello superiore. |
| ***Pad*** | Se il frame (esclusi preambolo e delimiter) è più corto di 64 byte, con questo campo lo si porta alla lunghezza di 64 byte, vedremo poi perché. |
| ***Checksum*** | è un codice CRC come quelli già visti. |

Indirizzi Ethernet:



Il bit 46 distingue gli indirizzi locali da quelli globali.

Gli indirizzi globali sono assegnati dalla IEEE per assicurare l’unicità degli indirizzi.

Sono disponibili ≈ 7 x indirizzi globali.

Tutte le stazioni ricevono il frame e lo accettano se l’indirizzo destinazione è compatibile con quello a loro assegnato.

• Se la trasmissione è ***unicast*** solo la stazione con l’indirizzo specificato nel campo destinazione del frame accetta il pacchetto. Le altre stazioni lo scartano

• Il riconoscimento dell’indirizzo è a livello hardware

\* Se l’interfaccia è configurata in modo promiscuo, accetta tutti i pacchetti

Nessun livello MAC garantisce un servizio affidabile. Ciò è dettato dal fatto che, visto il bassissimo tasso d'errore delle LAN, si preferisce un protocollo datagram ad alte prestazioni.

Vediamo ora perché esiste un limite minimo di 64 byte per la lunghezza di un frame.

Abbiamo già visto che, perché una collisione possa essere certamente rilevata da chi trasmette, deve passare un tempo non inferiore a due volte il tempo di attraversamento dell'intera rete.

Nel caso di IEEE 802.3, che prevede 2,5 km di lunghezza massima totale e l'interposizione di un massimo di quattro ripetitori, si ha che il tempo massimo di attraversamento dell'intera rete moltiplicato per due è pari a 57,6 microsecondi.

Ora, è essenziale che la collisione venga rilevata durante la trasmissione e non dopo, altrimenti il mittente dedurrà erroneamente che la sua trasmissione è andata a buon fine.

Dunque, la trasmissione di un frame non deve durare meno di 57,6 microsecondi, che sono il tempo necessario per trasmettere (a 10 Mbps) proprio 72 byte (e cioé 576 bit, ciascuno dei quali viene trasmesso in un decimo di microsecondo). Dunque, il frame non può essere costituito da meno di 72 byte, 8 dei quali sono costituiti dal preambolo e dal delimitatore, e 64 dal resto del frame.

Si noti che se si vuole aumentare la velocità di un certo fattore, diciamo 10, si deve diminuire di 10 volte la lunghezza massima ammessa per la rete o aumentare di 10 volte la lunghezza minima del frame. Vedremo nel seguito come viene risolto il problema per il protocollo ***Fast Ethernet*** (100 Mbps).

Il protocollo 802.3 è un CSMA/CD di tipo 1-persistent:

* prima di trasmettere, la stazione aspetta che il canale sia libero;
* appena è libero inizia a trasmettere;
* se c'è una collisione, la circuiteria contenuta nel transceiver invia una sequenza di jamming di 32 bit, per avvisare le altre stazioni;
* se la trasmissione non riesce, la stazione attende una quantità di tempo casuale e poi riprova.

La quantità di tempo che si lascia passare è regolata da un apposito algoritmo, il ***binary backoff exponential algorithm***:

* dopo una collisione, il tempo si considera discretizzato (slotted) con uno ***slot time*** pari a 51,2 microsecondi (corrispondenti al tempo di trasmissione di 512 bit, ossia 64 byte, pari alla lunghezza minima di un frame senza contare il preambolo ed il delimiter);
* **il tempo di attesa prima della prossima ritrasmissione è un multiplo intero dello slot time, e viene scelto a caso in un intervallo i cui estremi dipendono da quante collisioni sono avvenute; (va a premiare chi ha fatto meno collisioni)**
* dopo n collisioni, il numero r di slot time da lasciar passare è scelto a caso nell'intervallo 0 <= r <= 2k-1, con k = min (n, 10);
* dopo 16 collisioni si rinuncia (inviando un messaggio di errore al livello superiore).

La crescita esponenziale dell'intervallo garantisce una buona adattabilità ad un numero variabile di stazioni, infatti:

* se il range fosse sempre piccolo, con molte stazioni si avrebbero praticamente sempre collisioni;
* se il range fosse sempre grande, non ci sarebbero quasi mai collisioni ma il ritardo medio (metà range\*slot time) causato da una collisione sarebbe molto elevato.

Le prestazioni osservate sono molto buone, migliori di quelle stimabili in via teorica.

Peraltro, queste ultime sono fortemente influenzate dal modello di traffico che si assume.

Di solito lo si assume poissoniano, ma in realtà è bursty e per di più ***self similar***, ossia il suo andamento su un lungo periodo è simile a quello su un breve periodo, ricordando in questo le caratteristiche dei frattali.

La pratica ha mostrato che 802.3:

* può sopportare un carico medio del 30% (3 Mbps) con picchi del 60% (6 Mbps);
* sotto carico medio:
  + il 2-3% dei pacchetti ha una collisione;
  + qualche pacchetto su 10.000 ha più di una collisione.

### 6.13.2 Fast Ethernet

Questo standard (803.2u), approvato nel 1995, prevede l'aumento di velocità di un fattore 10, da 10 Mbps a 100 Mbps.

Come si risolve il problema del minimo tempo di trasmissione e/o della massima lunghezza della rete? In modo diverso a seconda del supporto fisico utilizzato:

* Doppino classe 3 (100BaseT4)
  + si usano quattro doppini fra l'hub ed ogni stazione:
    - uno viene usato sempre per il traffico dall'hub alla stazione;
    - uno viene usato sempre per il traffico dalla stazione all'hub;
    - 2 vengono usati di volta in volta nella direzione della trasmissione in corso;
  + la codifica è ***8B6T***, cioé 8 bit vengono codificati con 6 ***trit*** (che hanno valore 0, 1 o 2);
  + la velocità di segnalazione è 25 Mhz (solo 25% in più di quella dello standard 802.3, che è di 20 Mhz);
  + si inviano 3 trit sui 3 doppini contemporaneamente a 25 Mhz, ossia 6 trit alla frequenza di 12,5 Mhz. Poiché 6 trit convogliano 8 bit, di fatto si inviano 8 bit a 12,5 Mhz, ottenendo così i 100 Mbps.
* Doppino classe 5 (100BaseT)
  + velocità di segnalazione 124 Mhz;
  + codifica ***4B5B*** (4 bit codificati con 5 bit, introducendo ridondanza);
  + a seconda del tipo di hub:
    - **hub tradizionale**: la lunghezza massima di un ramo è 100 metri, quindi il diametro della rete è 200 metri (contro i 2,5 km di 802.3).
    - ***switched hub***: ogni ramo è un dominio di collisione separato, e quindi (poiché su esso vi è una sola stazione) non esiste più il problema delle collisioni, ma rimane il limite di 100 metri per i limiti di banda passante del doppino.
* Fibra ottica (100BaseFX) 802.3u
  + velocità di segnalazione 125 Mhz;
  + codifica 4B5B;
  + obbligatorio switched hub;
  + lunghezza rami fino a 2 km (con uno switched hub non c'è il problema delle collisioni, ed inoltre come sappiamo la fibra regge velocità dell'ordine dei Gbps a distanze anche superiori).

### 6.13.3 IEEE 802.5

Nel 1972 IBM scelse l'anello per la sua architettura di LAN, a cui diede il nome di ***Token Ring***. Successivamente, IEEE ha definito lo standard IEEE 802.5 sulla base di tale architettura.

Le differenze principali sono che la rete IBM prevede velocità di 4 Mbps e 16 Mbps, mentre 802.5 prevede oltre ad esse anche la velocità di 1 Mbps

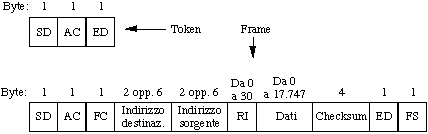
ll cablaggio più diffuso è basato su doppino telefonico:

* schermato (STP);
* non schermato (UTP):
  + categoria 3, 4 o 5 per 4 Mbps;
  + categoria 4 o 5 per 16 Mbps.

Normalmente il cablaggio è fatto utilizzando un ***wire center***, che ha la possibilità di isolare parti dell'anello guaste: se manca corrente su un lobo il corrispondente relais si chiude automaticamente.

Viene usata la codifica ***Differential Manchester Encoding.***

La struttura del token e del frame di 802.5 è la seguente:



I campi del frame hanno le seguenti funzioni:

|  |  |
| --- | --- |
| ***SD, ED*** | Starting e ending delimiter: contengono all'interno due coppie di bit codificati con i valori high-high e low-low, in violazione della codifica Manchester. Si usano high-high e low-low accoppiati per non introdurre uno sbilanciamento del codice. |
| ***AC*** | Access control, serve per il controllo dell'accesso. E' costituito di 8 bit:  PPPTMRRR   * i tre bit P indicano la ***priorità attuale***; * il bit M serve per il controllo di ***frame orfani***: il monitor lo setta ad 1 al passaggio del frame, e se lo ritrova ad uno al passaggio successivo il frame è orfano e viene tolto dall'anello; * il bit T, detto ***token bit***, identifica un token (se vale 0) o un frame (se vale 1); * i tre bit R indicano la priorità richiesta. |
| ***FC*** | Frame control, distingue frame contenenti dati da frame con funzioni di controllo. |
| ***Indirizzi*** | come 802.3. |
| ***RI*** | Routing information, contiene (se c'è) le informazioni necessarie al source routing (vedremo più avanti). |
| ***Dati*** | contiene il payload del livello superiore. |
| ***Checksum*** | è un codice CRC come quelli già visti. |
| ***FS*** | Frame status, serve per sapere cosa è successo del frame. Contiene, fra l'altro, due bit, A e C, gestiti come segue:   * bit A: viene messo ad 1 (dal destinatario) quando il frame gli arriva; * bit C: viene messo ad 1 (dal destinatario) quando il frame gli arriva ed il destinatario lo copia al suo interno. |

**Funzionamento di 802.5**

Quando il token circola e una stazione vuole trasmettere, essa, che è in listen mode, opera come segue:

* aspetta che arrivi il token;
* quando il token arriva:
  + lascia passare SD;
  + lascia passare i bit PPP di AC;
  + quando ha nel buffer il token bit T:
    - lo cambia in uno, trasformando il token in un frame;
    - invia il bit T modificato sul ring;
    - si mette immediatamente in transmit mode;
    - invia il resto del frame;
* quando il frame è trasmesso:
  + se non ha esaurito il ***THT*** (***Token holding time***) può trasmettere un altro frame;
  + altrimenti rigenera un nuovo token e lo trasmette;
  + appena trasmesso l'ultimo bit del token si rimette immediatamente in listen mode.

Ogni ring ha una stazione con un ruolo speciale, il ***monitor*** (ogni stazione è in grado di diventare il monitor).

Se una stazione si accorge che non c’è monitor, trasmette un frame di controllo Claim Token. Se il frame ritorna, essa diviene il monitor.

Il monitor annuncia periodicamente la sua presenza con un frame di controllo Active Monitor Present.

Il monitor viene designato all'avvio dell'anello. I suoi compiti principali sono:

* rigenerare il token se esso si perde;
* ripulire il ring dai resti di frame danneggiati;
* ripulire il ring dai frame orfani.

**Confronto tra 802.3 ed 802.5**

Vantaggi di 802.3:

* ha un'enorme diffusione;
* esibisce un buon funzionamento a dispetto della teoria.

Svantaggi di 802.3

* ha sostanziose componenti analogiche (per il rilevamento delle collisioni);
* il funzionamento peggiora con forte carico.

Vantaggi di 802.5:

* è totalmente digitale;
* va molto bene sotto forte carico.

Svantaggi di 802.5

* c'è ritardo anche senza carico (per avere il token);
* ha bisogno di un monitor (e se è "malato", cioé malfunzionante, e nessuno se ne accorge?).

In definitiva, nessuna delle due può essere giudicata la migliore in assoluto.

### 6.13.4 IEEE 802.2

Questo standard, chiamato ***Logical Link Control*** (***LLC***),definisce la parte superiore del livello data link in modo indipendente dai vari sottolivelli MAC.

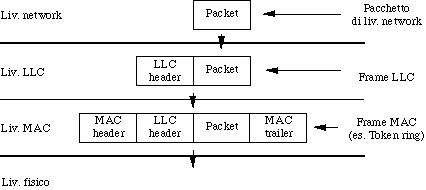
Ha due funzioni principali:

* fornire al livello network un'interfaccia unica, nascondendo le differenze fra i vari sottolivelli MAC;
* fornire, se è richiesto dal livello superiore, un servizio più sofisticato di quello offerto dai vari sottolivelli MAC (che, ricordiamo, offrono solo servizi datagram). Esso infatti offre:
  + servizi datagram;
  + servizi datagram confermati;
  + servizi affidabili orientati alla connessione.

Il frame LLC è modellato ispirandosi a HDLC, con indirizzi di mittente e destinatario, numeri di sequenze, numeri di ack (questi ultimi due omessi per i servizi datagram), ecc.

Gli indirizzi LLC sono lunghi un byte e servono sostanzialmente ad indicare quale protocollo di livello superiore deve ricevere il pacchetto di livello tre; in questo modo LLC offre un supporto multiprotocollo al livello superiore.

Il frame LLC viene imbustato, in trasmissione, in un frame dell'opportuno sottolivello MAC. Il processo inverso ha luogo in ricezione.



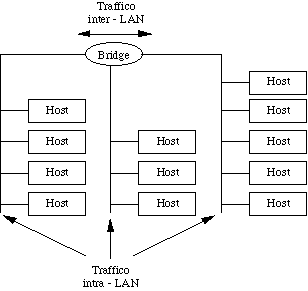
## 6.14 Il Bridge

Molto spesso c'è la necessità di connettere fra di loro LAN distinte, per molte ragioni:

* due LAN di tipo differente (ad esempio una Ethernet ed una Token ring), che non si possono semplicemente collegare l'una con l'altra, contengono host che vogliono dialogare fra loro;
* si vuole una LAN la cui lunghezza superi i limiti massimi consentiti (ad esempio, 2,5 km per Ethernet);
* si desidera, nel caso di una LAN contenente molti host, suddividerla in molteplici LAN interconnesse. Questo per tenere separato il traffico generato nelle sue parti, in modo da avere un traffico totale molto superiore a quello possibile su una singola LAN.

Due o più LAN possono essere interconnesse con dispositivi detti ***bridge***, che operano a livello data link.

Ciò significa che la loro operatività è basata esclusivamente sulle informazioni contenute nelle buste di livello due, mentre non vengono prese affatto in considerazione quelle di livello tre. Questa è la caratteristica fondamentale che li differenzia dai ***router***, che invece agiscono a livello tre.



In questo esempio il traffico totale (se è tutto confinato entro le singole LAN) può arrivare a tre volte quello di una singola LAN. Solo il traffico fra host di LAN diverse attraversa il bridge.

I bridge si occupano di instradare il traffico da una LAN all'altra. E' importante sottolineare che, anche se l'instradamento di per se è una funzione tipica del livello tre, qui avviene sulla base dei soli indirizzi di livello due, quindi il bridge appartiene in tutto e per tutto al livello data link.

Il funzionamento di un bridge, che ha tante interfacce di rete quante sono le LAN alle quali è fisicamente collegato, è il seguente:

* quando una delle interfacce di rete del bridge riceve un frame MAC, lo passa al relativo software di livello MAC che toglie la busta MAC;
* il resto viene passato dal livello MAC al software di livello LLC del bridge, nel quale, sulla base dell'indirizzo di destinazione, si decide a quale LAN inviarlo:
  + se la destinazione si trova sulla LAN di provenienza il frame viene scartato;
  + altrimenti, il frame LLC viene passato al livello MAC competente per la LAN di destinazione, che lo imbusta in un frame MAC e provvede ad inviarlo su tale LAN, secondo le regole di quest'ultima.

Si noti che un bridge è ben diverso da un ripetitore, che copia pedissequamente tutto ciò che riceve da una linea su tutte le altre. Il bridge infatti acquisisce un frame, lo analizza, lo ricostruisce e lo instrada, quindi può anche essere configurato in modo da ***filtrare*** (cioé non far passare) alcuni tipi di traffico. Ciò tipicamente avviene in funzione dell'indirizzo LLC, che identifica il protocollo di livello superiore, o sulla base dell'indirizzo MAC del mittente o del destinatario.

I bridge progettati per interconnettere LAN di tipo diverso devono risolvere vari problemi legati alle diverse regole in vigore su tali LAN, tra cui:

* formati dei frame differenti;
* data rate differenti;
* massima lunghezza di frame differente: è fuori questione spezzare un frame in questo livello, dato che tutti i protocolli si aspettano che il frame o arrivi per intero o non arrivi affatto; ad esempio, nello standard 802 i frame troppo grandi devono essere scartati;
* funzioni previste da un tipo di LAN ma non dall'altra: ad esempio, il concetto di priorità ed i bit A e C presenti in 802.5 non hanno un equivalente in 802.3.

### 6.14.1 Standard IEEE per i bridge

Ci sono due tipi di bridge standardizzati da IEEE:

* ***transparent bridge*** (promossi dai comitati 802.3 e 802.4)
* ***source-routing bridge*** (scelti dal comitato 802.5)

Il ***transparent bridge*** (IEEE 802.1 part D) può essere installato e diventare operativo in modo totalmente trasparente, senza richiedere niente altro che la connessione fisica e l'accensione. Incredibile a dirsi, la cosa funziona!

Il meccanismo è il seguente:

* Dal momento in cui il bridge viene attivato, esamina tutti i frame che gli arrivano dalle varie LAN, e sulla base di questi costruisce progressivamente le sue tabelle di instradamento. Infatti, ogni frame ricevuto consente al bridge di sapere su quale LAN si trova la stazione che lo ha inviato.
* Ogni frame che arriva al bridge viene ritrasmesso:
  + se il bridge ha nelle sue tabelle di instradamento l'indirizzo del destinatario, invia il frame sulla corrispondente LAN;
  + altrimenti il frame viene inviato a tutte le LAN tranne quella di provenienza, con una tecnica detta ***flooding*** (che vedremo meglio più avanti);
  + man mano che il bridge aumenta la sua conoscenza degli indirizzi delle varie macchine, la ritrasmissione diventa sempre più selettiva (e quindi più efficiente).
* Le tabelle vengono aggiornate ogni qualche minuto, rimuovendo gli indirizzi che non si sono fatti vivi nell'ultimo periodo (così, se una macchina si sposta, entro pochi minuti viene di nuovo indirizzata correttamente) Questa tecnica si chiama ***backward learning***.
* Se ci sono maglie nella topologia di connessione delle LAN, i bridge si costruiscono di essa uno ***spanning tree***, che poi utilizzano per l'instradamento, al fine di evitare la generazione di un infinito numero di duplicati durante il flooding.

Il ***source-routing bridge*** (nato per le reti 802.5) è progettato invece per ottenere l'instradamento più efficiente possibile, anche a scapito della trasparenza.

L'idea di base è che il mittente indichi esplicitamente il cammino (espresso come sequenza di bridge e reti) che il frame deve percorrere. L'amministratore di sistema deve assegnare numeri di identificazione distinti ad ogni rete e ad ogni bridge, operazione che deve essere fatta manualmente.

Tali informazioni sono incluse in un apposito campo ***RI*** (***Routing Information***) del frame 802.5, e la loro eventuale presenza è indicata dal valore 1 del bit più significativo dell'indirizzo sorgente (che, essendo sempre relativo a un indirizzo singolo e mai di gruppo o broadcast, originariamente è sempre zero). Il bridge esamina solo i frame che hanno tale bit a uno.

E' ovvio che ogni host deve avere il quadro della topologia delle connessioni, memorizzato in un'apposita struttura dati. Per costruirla e mantenerla, il meccanismo usato è il seguente:

* quando un host deve spedire un frame ma non conosce il cammino da seguire per raggiungere la destinazione, invia un ***discovery frame***, chiedendo tale informazione;
* il discovery frame viene inviato in flooding da ogni bridge a tutti gli altri, e quindi raggiunge tutti gli host. In questa fase, ogni bridge scrive nel discovery frame il suo ID, che si aggiunge a quello dei bridge precedentemente incontrati. Quando un discovery frame arriva alla destinazione, contiene tutto il cammino percorso;
* quando l'host di destinazione riceve un discovery frame, lo invia indietro al mittente;
* il mittente, sulla base del primo discovery frame che ritorna (considerando il relativo cammino quello più conveniente) aggiorna le sue tabelle e può mandare il frame che voleva spedire originariamente.

Un vantaggio di questo schema di funzionamento è che si trova sempre il cammino ottimo; uno svantaggio è l'esplosione del numero di discovery frame.

Dopo un periodo in cui entrambi gli standard sopra descritti erano abbastanza diffusi, oggi praticamente tutti i bridge costruiti sono di tipo transparent, ed al più offrono la funzionalità source-routing come un'opzione supplementare.

### 6.14.2 Switch

Stessa modalità di funzionamento del bridge. Ha un numero di porte > 2 (8, 12, 24, ...)

Ogni porta può essere collegata a un segmento della rete o a una stazione singola.

Contiene una tabella (**SAT = Source Address Table)** dove mappa le porte con gli indirizzi MAC.

La sua tecnologia può essere basata su:

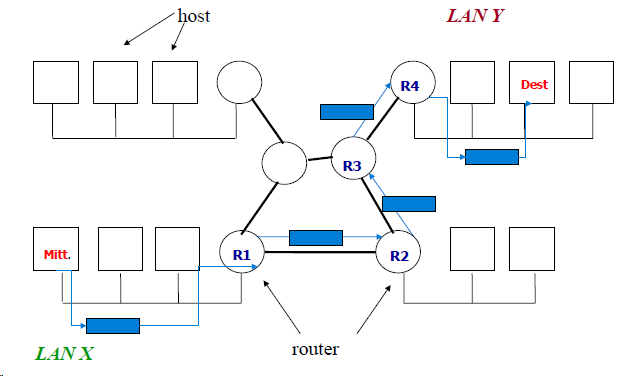
* **Shared Memory:** Memorizza i pacchetti in una memoria comune a tutte le porte. Invia i pacchetti in memoria alla porta destinazione
* **Matrix:** Utilizza una matrice di commutazione. In base all’indirizzo e al contenuto della tabella viene attivata la connessione necessaria.
* **Bus-Architecture**: Ha un BUS interno condiviso ad alta velocità. La comunicazione interna usa TDMA

Inoltre, ci sono diverse tipologie di switch:

* **Cut-through-switching:** Il frame è subito reindirizzato sulla porta corretta
* **Store-and-forward:** Il frame è letto completamente dallo switch; viene controllato il CRC; in caso di errore il frame è scartato; permette di filtrare il traffico
* **Port-based-switching:** Ad ogni porta corrisponde un solo indirizzo Ethernet
* **Segment-based-switching:** Ad ogni porta corrispondono più indirizzi (ad esempio è collegato un HUB)

# **LEZIONE 10 – LIVELLO NETWORK**

Il livello network è incaricato di muovere i pacchetti dalla sorgente fino alla destinazione finale, ottenuto con salti (**hop**) da un **router** all’altro attraversando reti intermedie.



Ciò è molto diverso dal compito del livello data link, che è di muovere informazioni solo da un capo all'altro di un singolo canale di comunicazione wire-like.

Le incombenze principali di questo livello sono:

* conoscere la topologia della rete;
* scegliere di volta in volta il cammino migliore (***routing***);
* gestire il flusso dei dati e le congestioni (***flow control*** e ***congestion control***);
* gestire le problematiche derivanti dalla presenza di più reti eterogenee (***internetworking***).

Nel progetto e nella realizzazione del livello network di una architettura di rete si devono prendere decisioni importanti in merito a:

* ***servizi offerti*** al livello transport;
* ***organizzazione interna*** della subnet di comunicazione.

## 10.1 Servizi offerti

In merito ai servizi offerti al livello superiore, ci sono (come abbiamo già accennato) due tipologie fondamentali di servizi:

* servizi connection-oriented;
* servizi connectionless.

In proposito, ci sono due scuole di pensiero:

* fautori dei servizi connection-oriented (compagnie telefoniche);
* fautori dei servizi connectionless (Internet Community).

***Connection-oriented*** (circuiti virtuali): *viene stabilito un circuito virtuale fra sorgente e destinazione*

L’ID di tale circuito viene trasmesso con il pacchetto, e tutti i router, lungo il cammino, inoltrano il pacchetto in base ad esso.

***Connectionless***: *i router di volta in volta stabiliscono (in base all’indirizzo del nodo destinatario) su quale linea far proseguire la trasmissione*.

La scelta si basa su apposite *tabelle di instradamento* (***routing table***) in cui, per ogni possibile destinazione, viene indicata la linea d’uscita.

## 10.2 Algoritmi di Routing

La funzione principale del livello network è di instradare i pacchetti sulla subnet, tipicamente facendo fare loro molti ***hop*** (letteralmente, salti) da un router ad un altro.

Un ***algoritmo di routing*** è quella parte del software di livello network che decide su quale linea di uscita instradare un pacchetto che è arrivato.

Mentre nelle subnet ***connection-oriented*** l’***algoritmo di routing*** viene applicato solo nella fase di setup (***session routing***), in quelle ***connectionless*** viene applicato ex novo per ogni pacchetto.

Un algoritmo di routing deve essere:

* di ***facile implementazione***;
* ***robusto*** (deve essere in grado di operare anche in caso di cadute di linee e/o router);
* ***convergente*** (e possibilmente in fretta);
* ***ottimale*** (scegliere il percorso ottimo).

## 10.3 Principio di ottimalità

E' possibile fare una considerazione generale sull'ottimalità dei cammini, indipendentemente dallo specifico algoritmo adottato per selezionarli.

Il ***principio di ottimalità*** dice che se il router j è nel cammino ottimo fra i e k, allora anche il cammino ottimo fra j e k è sulla stessa strada:

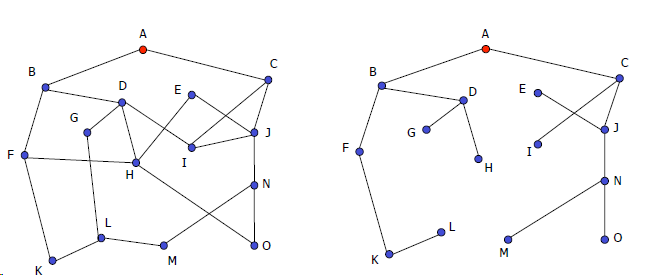


Se così non fosse, ci sarebbe un altro cammino (ad es. quello tratteggiato in figura) fra j e k migliore di quello che è parte del cammino ottimo fra i e k, ma allora ci sarebbe anche un cammino fra i e k migliore di quello ottimo.

Una diretta conseguenza è che l'insieme dei cammini ottimi da tutti i router a uno specifico router di destinazione costituiscono un ***albero***, detto ***sink tree*** per quel router.

In sostanza, gli algoritmi di routing cercano e trovano i sink tree relativi a tutti i possibili router di destinazione, e quindi instradano i pacchetti esclusivamente lungo tali sink tree.

Il ***Sink tree*** per un router ***A*** è l’***albero*** costituito dall’insieme dei cammini ottimi da tutti i router ad ***A***.



Gli algoritmi di routing individuando i sink tree relativi a tutti i possibili router destinazione, ed instradando esclusivamente attraverso i cammini previsti dal sink-tree, instradano i pacchetti sempre per il cammino ottimo.

## 10.4 Classificazione algoritmi di routing

Gli algoritmi di routing, possono essere:

* **statici:** Sono detti anche **algoritmi non adattivi** poiché sono eseguiti solamente all'avvio della rete, e le decisioni di routing a cui essi pervengono sono poi applicate senza più essere modificate. I router instradano i pacchetti secondo i circuiti virtuali ad essi inizialmente associati;
* **dinamici:** Sono detti anche **algoritmi adattivi** poiché ogni router sceglie la porta di uscita in base all’indirizzo del destinatario, al traffico, alla topologia della rete, ecc.

## 10.5 Algoritmi di routing statici

### 10.5.1 Shortest path routing

L'idea dello **Shortest path routing** è semplice: un host di gestione della rete mantiene un grafo che rappresenta la subnet:

* i nodi rappresentano i router;
* gli archi rappresentano le linee punto-punto.

All'avvio della rete (o quando ci sono variazioni permanenti della topologia) l'algoritmo:

* applica al grafo un algoritmo per il calcolo del ***cammino minimo*** fra ogni coppia di nodi; ad esempio, il noto algoritmo di Dijkstra ('59) può essere usato;
* invia tali informazioni a tutti i router.

Il cammino minimo cambia in funzione delle grandezze che si desidera minimizzare (numero di hop, lunghezza dei collegamenti, …).

### 10.5.2 Flooding

La tecnica del ***flooding*** consiste nell'inviare ogni pacchetto su tutte le linee eccetto quella da cui è arrivato.

In linea di principio il flooding può essere usato come algoritmo di routing (ogni pacchetto inviato arriva a tutti i router) ma presenta l'inconveniente di generare un numero enorme (teoricamente infinito!) di pacchetti.

Ci sono delle tecniche per limitare il traffico generato:

* inserire in ogni pacchetto un ***contatore*** che viene decrementato ad ogni hop. Quando il contatore arriva a zero, il pacchetto viene scartato. Un appropriato valore iniziale può essere il diametro della subnet;
* inserire la coppia (***source router ID, sequence number***) in ogni pacchetto. Ogni router esamina tali informazioni e ne tiene traccia, e quando le vede per la seconda volta scarta il pacchetto;
* ***selective flooding***: i pacchetti vengono duplicati solo sulle linee che vanno all'incirca nella giusta direzione (per questo si devono mantenere apposite tabelle a bordo).

### 10.5.3 Flow-based routing

Questo algoritmo è basato sull'idea di:

* calcolare in anticipo il traffico atteso su ogni linea;
* da questi calcoli derivare una stima del ritardo medio atteso per ciascuna linea;
* basare su tali informazioni le decisioni di routing.

Sceglie il cammino che minimizza il ritardo medio.

Per applicare l'algoritmo è necessario conoscere:

* *la topologia della rete*;
* *la matrice del traffico* ***T(i,j)*** *(l’elemento* ***t****(****i****,****j****) indica il traffico stimato fra il router* ***i*** *ed il router* ***j****)*;
* *la matrice delle capacità* ***B(i,j)****, espresse in bps (l’elemento* ***b****(****i****,****j****) indica la capacità della linea point to point che collega il router* ***i*** *al router* ***j****)*.

Il ***Flow-based routing*** calcola il ***ritardo medio dell'intera rete*** effettuando la somma pesata dei ritardi delle singole linee (il peso di ogni linea è dato dal traffico su quella linea diviso il traffico

totale sulla rete).

***Fissato un percorso tra mittente e destinatario:***

* *si calcola il traffico che incide su ogni linea (dato alla somma di tutti i* ***t(i,j)*** *instradati su quella linea);*
* *si calcola il ritardo di ogni linea;*
* *si calcola il ritardo medio dell’intero percorso;*
* *si ripete il procedimento per tutti i possibili percorsi, scegliendo alla fine quello che ha il minimo ritardo medio*

## 10.6 Algoritmi dinamici

Nelle moderne reti si usano algoritmi dinamici, che si adattano automaticamente ai cambiamenti della rete. Questi algoritmi non sono eseguiti solo all'avvio della rete, ma rimangono in esecuzione sui router durante il normale funzionamento della rete.

### 10.6.1 Distance vector routing

Ogni router mantiene una tabella (***vector***) contenente un elemento per ogni altro router. Ogni elemento della tabella contiene:

* la distanza (numero di hop, ritardo, ecc.) che lo separa dal router in oggetto;
* la linea in uscita da usare per arrivarci;

Per i suoi vicini immediati il router stima direttamente la distanza dei collegamenti corrispondenti, mandando speciali ***pacchetti ECHO*** e misurando quanto tempo ci mette la risposta a tornare.

A intervalli regolari ogni router manda la sua tabella a tutti i vicini, e riceve quelle dei vicini.

Quando un router riceve le nuove informazioni, calcola una nuova tabella scegliendo, fra tutte, la concatenazione migliore

**se stesso -> router immediato -> router remoto di destinazione**

per ogni destinazione.

Ovviamente, la migliore è la concatenazione che produce la minore somma di:

* distanza fra il router stesso ed un suo vicino immediato (viene dalla misurazione diretta);
* distanza fra quel vicino immediato ed il router remoto di destinazione (viene dalla tabella ricevuta dal vicino immediato).

L'algoritmo **distance vector routing** funziona piuttosto bene, ma è molto lento nel reagire quando un collegamento va giù. Ciò è legato al fatto che i router non conoscono la topologia della rete.

Infatti, consideriamo questo esempio:

A B C D E <- Router

\*-----\*-----\*-----\*-----\* <- Collegamenti (topologia lineare)

1 2 3 4 <- Distanze da A

Se ora cade la linea fra A e B, dopo uno scambio succede questo:

A B C D E <- Router

\* \*-----\*-----\*-----\* <- Collegamenti

3 2 3 4 <- Distanze da A (dopo uno scambio)

Ciò perché B, non ricevendo risposta da A, crede di poterci arrivare via C, che ha distanza due da A. Col proseguire degli scambi, si ha la seguente evoluzione:

A B C D E <- Router

\* \*-----\*-----\*-----\* <- Collegamenti

3 4 3 4 <- Distanze da A (dopo due scambi)

5 4 5 4 <- Distanze da A (dopo tre scambi)

5 6 5 6 <- Distanze da A (dopo quattro scambi

A lungo andare, tutti i router vedono lentamente aumentare sempre più la distanza per arrivare ad A. Questo è il problema del ***count-to-infinity***.

Se la distanza rappresenta il numero di hop si può porre come limite il diametro della rete; nel caso invece rappresentasse il tempo, i cammini che a causa della congestione dovessero presentare un forte ritardo, verrebbero erroneamente considerati interrotti.

Sono state proposte molte soluzioni al problema count-to-infinity, ma nessuna veramente efficace.

Nonostante ciò, il distance vector routing era l'algoritmo di routing di ARPANET ed è usato anche in Internet col nome di ***RIP*** (***Routing Internet Protocol***), e nelle prime versioni di DECnet e IPX.

### 10.6.2 Link state routing

Soprattutto a causa della lentezza di convergenza del distance vector routing, si è cercato un approccio diverso, che ha dato origine al ***link state routing***.

L'idea è questa:

* ogni router tiene sott'occhio lo stato dei collegamenti fra se e i suoi vicini immediati (misurando il ritardo di ogni linea) e distribuisce tali informazioni a tutti gli altri;
* sulla base di tali informazioni, ogni router ricostruisce localmente la topologia completa dell'intera rete e calcola il cammino minimo fra se e tutti gli altri.

Quando il router si avvia, invia un ***pacchetto HELLO*** su tutte le linee in uscita. In risposta riceve dai vicini i loro indirizzi (univoci in tutta la rete).

Successivamente, invia vari pacchetti ECHO, misurando così il tempo di arrivo della risposta e, mediando su vari pacchetti, si deriva il ritardo della linea.

Si costruisce un pacchetto con:

* identità del mittente;
* numero di sequenza del pacchetto;
* età del pacchetto;
* lista dei vicini con i relativi ritardi.

La costruzione e l'invio di tali pacchetti si verifica tipicamente:

* a intervalli regolari;
* quando accade un evento significativo (es.: una linea va giù o torna su).

La distribuzione dei pacchetti è la parte più delicata, perché errori in questa fase possono portare qualche router ad avere idee sbagliate sulla topologia, con conseguenti malfunzionamenti.

Di base si usa il **flooding**, inserendo nei pacchetti le coppie (source router ID, sequence number) per eliminare i duplicati. Tutti i pacchetti sono confermati. Inoltre, per evitare che pacchetti vaganti (per qualche errore) girino per sempre, l'età del pacchetto viene decrementata ogni secondo e, quando arriva a zero, il pacchetto viene scartato.

Quindi, ricapitolando, il **link state routing**:

1. Scopre i propri vicini e i loro indirizzi di rete spedendo uno speciale pacchetto di **HELLO** su ogni linea
2. Misura il ritardo o il costo per ognuno dei suoi vicini con speciali pacchetti ECHO
3. Costruisce un pacchetto contenente tutto quello che ha appena scoperto, più l’identità del router ed un numero di sequenza a 32 bit
4. Via **flooding** spedisce questo pacchetto a tutti i router
5. Calcola il cammino minimo per ogni altro router utilizzando l’algoritmo di Dijkstra

Il link state routing è molto usato attualmente:

* in Internet ***OSPF*** (***Open Shortest Path First***) è basato su tale principio e si avvia ad essere l'algoritmo più utilizzato;
* un altro importante esempio è ***IS-IS*** (***Intermediate System-Intermediate System***), progettato per DECnet e poi adottato da OSI. La sua principale caratteristica è di poter gestire indirizzi di diverse architetture (OSI, IP, IPX) per cui può essere usato in reti miste o multiprotocollo.

## 10.7 Routing gerarchico

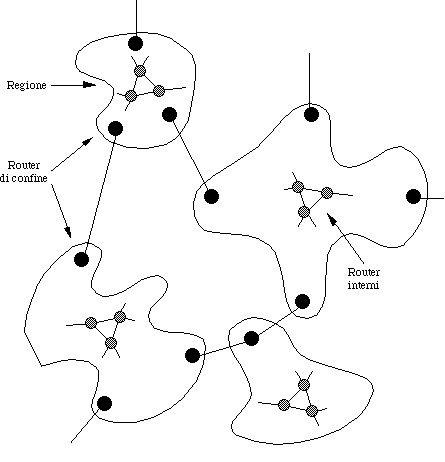
Quando la rete cresce fino contenere decine di migliaia di nodi, diventa troppo gravoso mantenere in ogni router la completa topologia. Il routing va quindi impostato in modo gerarchico, come succede nei sistemi telefonici.

La rete viene divisa in ***zone*** (spesso dette ***regioni***):

* all'interno di una regione vale quanto visto finora, cioè i router (detti ***router interni***) sanno come arrivare a tutti gli altri router della regione;
* viceversa, quando un router interno deve spedire qualcosa a un router di un'altra regione sa soltanto che deve farlo pervenire a un particolare router della propria regione, detto ***router di confine***.
* il router di confine sa a quale altro router di confine deve inviare i dati perché arrivino alla regione di destinazione.

Di conseguenza, ci solo due livelli di routing:

* un primo livello di routing all'interno di ogni regione;
* un secondo livello di routing fra tutti i router di confine.



**I router interni** mantengono nelle loro tabelle di routing:

* una entrata per ogni altro router interno, con la relativa linea da usare per arrivarci;
* una entrata per ogni altra regione, con l'indicazione del relativo router di confine e della linea da usare per arrivarci.

**I router di confine**, invece, mantengono:

* una entrata per ogni altra regione, con l'indicazione del prossimo router di confine da contattare e della linea da usare per arrivarci.

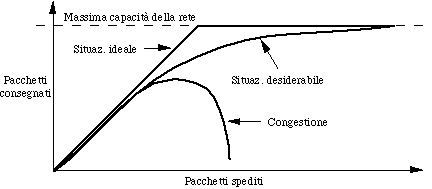
**Tabelle per il routing gerarchico:**

* **I router interni** mantengono una riga per ogni altro router interno, con la relativa lina da usare per arrivarci e una riga per ogni regione, con l’indicazione del relativo router di confine e della linea da usare per arrivarci.
* **I router di confine** mantengono una riga per ogni regione, con l’indicazione del router di confine da contattare e della linea da usare per arrivarci.

Non è detto che due livelli siano sufficienti. In tal caso il discorso si ripete su più livelli.

## 10.8 Controllo della congestione

Quando troppi pacchetti sono presenti in una parte della subnet, si verifica una ***congestione*** che degrada le prestazioni. Ciò dipende dal fatto che, quando un router non riesce a gestire tutti i pacchetti che gli arrivano, comincia a perderli, e ciò causa delle ritrasmissioni che aggravano ancor più la congestione.



La congestione in un router può derivare da diversi fattori:

* **troppi pochi buffer nel router**;
* **processore troppo lento nel router;**
* **linea di trasmissione troppo lenta** (si allunga la coda nel router di partenza).

Inoltre, la congestione in un router tende a propagarsi ai suoi vicini che gli inviano dati. Infatti, quando tale router è costretto a scartare i pacchetti che riceve non li conferma più, e quindi i router che li hanno spediti devono mantenerli nei propri buffer, aggravando così anche la propria situazione.

Il ***controllo della congestione*** è un problema globale di tutta la rete, ed è ben diverso dal problema del controllo di flusso nei livelli data link, network (nel caso dei servizi connection oriented) e trasporto, che invece riguarda una singola connessione sorgente-destinazione.

Ci sono due approcci al problema della congestione:

* ***open loop*** (senza controreazione);
* ***closed loop*** (con controreazione)

Nell’approccio **open loop** si fissano parametri per la rete (*velocità di trasmissione, ampiezza dei buffer..*) in modo che la congestione non si verifichi, ma poi **non** effettua azioni correttive.

Nell’approccio **closed loop** controlla la situazione della rete, intraprendendo le azioni opportune quando necessario.

### 10.8.1 Approccio Traffic shaping (open loop)

In questo approccio, di tipo open loop, l'idea è di forzare la trasmissione dei pacchetti a un ritmo piuttosto regolare, onde limitare la possibilità di congestioni.

Verdemo tre tecniche per implementare il traffic shaping:

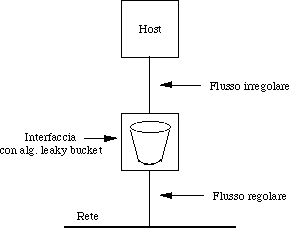
* ***leaky bucket***;
* ***token bucket***;
* ***flow specification***.

**Algoritmo Leaky bucket (secchio che perde)**

L'idea è semplice, e trova un’analogia reale in un secchio che viene riempito da un rubinetto (che può essere continuamente manovrato in modo da risultare più o meno aperto) e riversa l'acqua che contiene attraverso un forellino sul fondo, a ritmo costante. Se viene immessa troppa acqua, essa fuoriesce dal bordo superiore del secchio e si perde.

Sull'host si realizza (nell'interfaccia di rete o in software) un leaky bucket, che è autorizzato a riversare sulla rete pacchetti con un fissato data rate (diciamo b bps) e che mantiene, nei suoi buffer, quelli accodati per la trasmissione.

Se l'host genera più pacchetti di quelli che possono essere contenuti nei buffer, essi si perdono.



In questo modo l'host può anche produrre un traffico **bursty** senza creare problemi sulla rete, finché il data rate medio non supera i **b** bps, oltre si cominciano a perdere pacchetti.

**Algoritmo token bucket (secchio di gettoni)**

E' una tecnica per consentire un grado di irregolarità controllato anche nel flusso che esce sulla rete.

Essenzialmente, si accumula un credito trasmissivo con un certo data rate (fino ad un massimo consentito) quando non si trasmette nulla.

Quando poi c'è da trasmettere, lo si fa sfruttando tutto il credito disponibile per trasmettere, fino all'esaurimento di tale credito, alla massima velocità consentita dalla linea.

Il secchio contiene dei ***token***, che si creano con una cadenza prefissata (ad esempio uno ogni millisecondo) fino a che il loro numero raggiunge un valore M prefissato, che corrisponde all'aver riempito il secchio di token.

Per poter tramettere un pacchetto (o una certa quantità di byte), deve essere disponibile un token.

**Flow specification**

Il traffic shaping è molto efficace se tutti (sorgente, subnet e destinazione) si accordano in merito.

Un modo di ottenere tale accordo consiste nello specificare:

* le caratteristiche del traffico che si vuole inviare (data rate, grado di burstiness, ecc.);
* la qualità del servizio (ritardo massimo, frazione di pacchetti che si può perdere, ecc.).

Tale accordo si chiama ***flow specification*** e consiste in una struttura dati che descrive le grandezze in questione.

**Sorgente**, **subnet** e **destinatario** si accordano di conseguenza per la trasmissione.

Questo accordo viene preso prima di trasmettere, e può essere fatto sia in subnet connesse (e allora si riferisce al circuito virtuale) che in subnet non connesse (e allora si riferisce alla sequenza di pacchetti che sarà trasmessa).

In generale nelle reti connesse è più facile il controllo della congestione, perché le risorse per una connessione sono allocate in anticipo.

Quindi, nel caso di circuiti virtuali, per evitare la congestione è possibile negare l'attivazione di nuovi circuiti virtuali ove non vi siano sufficienti risorse per gestirli. Questa tecnica va sotto il nome di ***admission control***.

### 10.8.2 Approccio Choke packet (closed loop)

Quando il grado di utilizzo di una linea in uscita si avvicina ad una soglia prefissata, il router con un choke packet (**to choke: soffocare**) invita l’Host d’origine a diminuire il flusso.

Quando l'host sorgente riceve il choke packet diminuisce il flusso (tipicamente lo dimezza) e ignora i successivi choke packet per un tempo prefissato, perché tipicamente ne arriveranno molti in sequenza.

Trascorso tale tempo prefissato, l'host si rimette in attesa di altri choke packet. Se ne arrivano altri, riduce ancora il flusso. Altrimenti, aumenta di nuovo il flusso.

**Hop-by-hop choke packet**

L'unico problema della tecnica precedente è la lentezza di reazione, perché l'host che produce i pacchetti ci mette un certo tempo a ricevere i choke packet ed a diminuire di conseguenza il ritmo della trasmissione. Per migliorare le cose si può costringere ogni router sul percorso, appena riceve tali pacchetti, a rallentare subito il ritmo. In tal caso si parla di ***hop-by-hop choke packet***.

Questa tecnica rende molto più veloce il sollievo del router che ha per primo i problemi di congestione, ma richiede più spazio di buffer nei router sul percorso dall'host originario a quel router.

## 10.9 Internetworking

Come sappiamo, esistono diverse architetture di rete, ciascuna caratterizzata dalle scelte effettuate in molti settori fra i quali ricordiamo:

* i servizi offerti dai vari livelli (connection oriented o no, reliable o no, ecc.);
* le modalità di indirizzamento;
* la dimensione massima dei pacchetti.

Per connettere fra loro reti eterogenee si devono superare problemi non banali, tra i quali:

* difformità nei servizi offerti (ad esempio, un servizio connected viene offerto solo su una delle reti);
* difformità nei formati dei pacchetti e degli indirizzi;
* difformità, nelle subnet, dei meccanismi di controllo dell'errore e della congestione;
* difformità nella dimensione massima dei pacchetti.

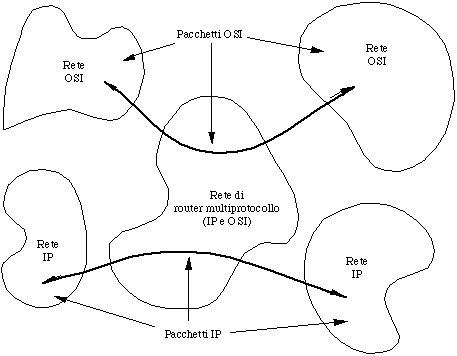
A causa di tali problemi, in generale (a meno che le architetture di rete non siano molto simili) non si usa questo approccio generale, ma altre tecniche più specifiche.

Tali tecniche sono basate sull'uso di particolari attrezzature, che operano a livelli diversi:

* i bridge, che abbiamo già visto e che operano a livello data link;
* i ***router multiprotocollo***: sono dei router in grado di gestire contemporaneamente più pile di protocolli.

**Reti di router multiprotocollo**

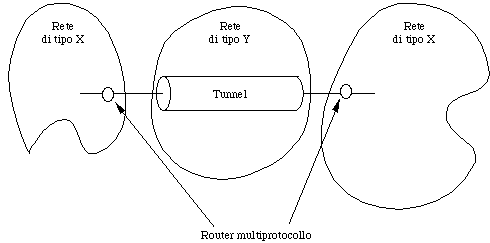
Mediante ricorso a tali apparecchiature diventa possibile, per esempio, impostare una internetwork costituita di reti eterogenee. Ogni rete può comunicare con le altre reti a lei conformi attraverso una porzione di rete costituita di router multiprotocollo.



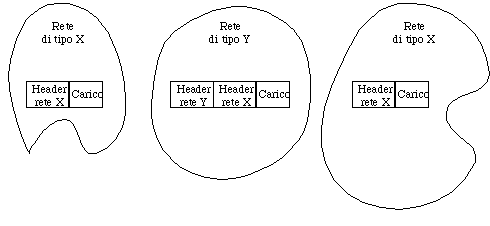
Le reti OSI possono parlare fra loro, e così quelle IP. Nella subnet costituita dai router multiprotocollo circolano pacchetti di entrambe le architetture, che vengono instradati secondo le regole di competenza dell'architettura di sui fanno parte.

**Tunneling**

Un' altra tecnica che risolve un problema analogo è il ***tunneling***, che si utilizza per mettere in comunicazione due reti uguali attraverso una rete diversa.



In questo caso la rete di tipo Y non è dotata di router multiprotocollo. Invece, un router designato in ciascuna delle due reti di tipo X è multiprotocollo e incapsula i pacchetti delle reti di tipo X dentro pacchetti di tipo Y, consegnandoli poi alla rete di tipo Y. Si noti che in questi pacchetti ci sono due buste di livello network:



**Frammentazione**

Un diverso problema che talvolta si presenta è legato al fatto che in generale è possibile che i pacchetti in arrivo da una rete siano troppo grandi per transitare su un altra.

In questo caso è necessario che il livello network della rete di origine (e di quella di destinazione) prevedano meccanismi di ***spezzettamento*** del pacchetto in ***frammenti*** prima di consegnarli alla rete di transito, e di ***ricomposizione*** dei frammenti appena essi giungono dalla rete di transito in quella di destinazione (come vedremo, il protocollo IP è fornito di questa funzionalità).

**Circuiti virtuali concatenati**

Se tutte le reti interessate offrono servizi connessi nel livello network, è possibile costruire un circuito virtuale che si estende attraverso più reti eterogenee come ***concatenazione di circuiti virtuali*** che attraversano ciascuno una delle reti. Ai confini fra ogni rete ci sono dei router multiprotocollo che:

* creano la porzione di circuito virtuale che attraversa la rete di competenza, arrivando fino ad un router multiprotocollo situato all'altra estremità della rete;
* instradano successivamente i pacchetti lungo tale circuito virtuale.

## 10.10 Internetwork routing

In generale, in una internetwork le singole reti componenti sono entità autonome e vengono chiamate ***AS*** (***Autonomous System***).

In questo caso, il routing complessivo è a due livelli:

* un primo livello è costituito dall'***Interior Gateway Protocol*** (***IGP***). Questo termine identifica l' algoritmo di routing usato da un AS al proprio interno. Naturalmente, diversi AS possono utilizzare diversi IGP. Come abbiamo già visto, un IGP può anche essere gerarchico, in particolare quando le dimensioni dell'AS sono considerevoli;
* un secondo livello è dato dall'***Exterior Gateway Protocol*** (***EGP***), che è l'algoritmo che si usa per gestire il routing fra diversi AS. Tipicamente, in questo scenario EGP è l'algoritmo di routing che riguarda i router multiprotocollo. L'aspetto più interessante relativo a EGP è che esso deve spesso tener conto di specifiche leggi nazionali (ad esempio, divieto di far transitare dati sul suolo di una nazione ostile), per cui le decisioni di routing devono adattarsi a tali direttive.

# **LEZIONE 11 – IL LIVELLO NETWORK (PARTE 2)**

## 11.1 Il livello network in Internet

Internet (una rete di reti) è una collezione di AS connessi gli uni con gli altri. Non esiste una struttura rigida, ma comunque si possono distinguere alcune componenti:

* **backbone principali** (linee ad alta velocità);
* reti regionali (USA);
* reti nazionali (Europa e resto del mondo);
* reti locali.

Ciò che tiene tutto insieme è il protocollo di livello network dell'architettura TCP/IP, e cioè ***IP*** (***Internet Protocol***, RFC [791](https://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/rfc/rfc791.txt)).

IP è un protocollo datagram, quindi non connesso e non affidabile (best effort), che opera come segue:

* riceve i dati dal livello transport e li incapsula in pacchetti di dimensione massima pari a 64 Kbyte (normalmente circa 1.500 byte);
* instrada i pacchetti sulla subnet, eventualmente frammentandoli lungo il viaggio;

**a destinazione:**

* riassembla (se necessario) i frammenti in pacchetti;
* estrae da questi i dati del livello transport;
* consegna al livello transport i dati nell'ordine in cui sono arrivati (che non è necessariamente quello in cui sono partiti)

I **datagrammi** contengono l’indirizzo del destinatario e ogni datagramma viene spedito/gestito indipendentemente. Essendo un protocollo non affidabile, la consegna non è garantita.

## 11.2 Header IP

Un pacchetto IP è costituito da un ***header*** e da una parte dati.

L'header ha una parte fissa di 20 byte e una parte, opzionale, di lunghezza variabile.

Immagine che contiene testo, Carattere, schermata, numero

Descrizione generata automaticamente

I campi dell'header hanno le seguenti funzioni:

|  |  |
| --- | --- |
| ***Version*** | il numero di versione del protocollo (oggi è 4). |
| ***IHL*** | lunghezza dell'header in parole di 32 bit (minimo 5, massimo 15). |
| ***Type of service (3+3+2 bit)*** | 3 bit per la precedenza, 3 bit per il tipo di servizio in termini di affidabilità, velocità e ritardo (può influenzare le scelte di routing), 2 inutilizzati |
| ***Total length*** | lunghezza del pacchetto (inclusi dati), massimo 65.535 byte. (2^16-1) |
| ***Identification*** | identifica il datagram a cui appartiene il frammento .Tutti i frammenti di uno stesso pacchetto hanno lo stesso valore. |
| ***FLAGS (1+1+1 bit)*** | il primo è inutilizzato, il secondo (**Don’t Fragment**) ordina ai router di non frammentare, il terzo indica se ci sono (**More Fragments**) o meno altri frammenti |
| ***Fragment offset (13 bit)*** | indice del frammento nel pacchetto. Massimo 8192 frammenti |
| ***Time to live*** | contatore (inizializzato a 255) utilizzato per limitare la vita dei pacchetti. Viene decrementato di uno a ogni hop (o ad ogni secondo). Quando arriva a zero, il pacchetto viene scartato e si invia una notifica al mittente |
| ***Protocol*** | codice del protocollo di livello transport a cui consegnare i dati (es. TCP o UDP) |
| ***Header checksum*** | checksum di controllo del solo header:   * si sommano (in complemento ad uno) le parole a 16 bit dello header, considerando il checksum a zero; * si complementa ad uno il risultato; * viene ricalcolato ad ogni hop (time to live cambia). |
| ***Source e destination address*** | indirizzi di mittente e destinatario. |
| ***Options*** | opzioni, solo cinque sono definite oggi:   * ***security***: quanto è segreto il pacchetto; * ***strict source routing***: specifica il percorso da seguire, dalla sorgente alla destinazione con una sequenza di indirizzi IP; * ***loose source routing***: fornisce una lista di router che non devono essere saltati; * ***record route***: forza i router ad aggiungere i loro IP nel campo opzione del pacchetto (max 9 router) * ***timestamp***: ogni router sul percorso oltre all’IP aggiunge anche un timestamp a 32 bit |

## 11.3 Indirizzi IP

L’indirizzo IP a 32 bit identifica univocamente un dispositivo (host o router) sulla rete.

Un indirizzo IP è formato da 32 bit e codifica due cose:

* ***network number***, cioé il numero assegnato alla rete IP (detta ***network***) su cui si trova l'elaboratore; in questo contesto una network è caratterizzata dal fatto di essere costituita da un unico canale di comunicazione cui sono connessi tutti gli host della network stessa (e quindi, ad esempio, una LAN oppure una linea punto punto fra due router);
* ***host number***, cioé il numero assegnato all'elaboratore.

La combinazione è unica: non possono esistere nell'intera rete Internet due indirizzi IP uguali.

Si noti che solitamente si ritiene che ogni host sulla rete abbia un singolo indirizzo IP. In realtà gli indirizzi sono assegnati alle interfacce di rete, quindi:

* se un host ha un'unica interfaccia di rete (come è il caso di un PC in LAN) allora ha un unico indirizzo IP;
* se un host ha X interfacce di rete (come è il caso di un router connesso ad una LAN e ad X-1 linee punto-punto) ha X indirizzi.

Gli indirizzi IP sono assegnati da autorità nazionali (***NIC***, ***Network Information Center***) coordinate a livello mondiale.

I formati possibili degli indirizzi sono i seguenti:

Immagine che contiene nero, oscurità

Descrizione generata automaticamente

Immagine che contiene testo, schermata, Carattere, linea

Descrizione generata automaticamente

**Indirizzi speciali:**

Immagine che contiene nero, oscurità

Descrizione generata automaticamente

Immagine che contiene testo, schermata, Carattere

Descrizione generata automaticamente

Ricapitolando, poiché alcune configurazioni binarie per gli indirizzi sono impegnate per gli indirizzi speciali, possono esistere:

* 126 network di classe A, le quali possono contenere 16 milioni di host ciascuna;
* 16382 network di classe B, con circa 64.000 host ciascuna;
* 2 milioni di network di classe C, con 254 host ciascuna.

Gli indirizzi sono usualmente espressi nella ***dotted decimal notation***, cioè i valori dei singoli byte sono espressi in decimale e sono separati da un punto, come nell'indirizzo:

*141.192.140.37*

In tale notazione, è possibile rappresentare separatamente il network number e l'host number. Per distinguerli, il primo è seguito da un punto. Ad esempio, nel caso dell'indirizzo IP precedente (che è relativo ad una network di tipo B), si ha:

* il network number è 141.192. (notare il punto finale);
* l'host number è 140.37 (non c'è il punto finale).

**Indirizzi privati:**

Gli indirizzi privati sono indirizzi riservati per reti (private) non connesse ad Internet

Immagine che contiene testo, schermata, Carattere, linea

Descrizione generata automaticamente

La suddivisione in Classi, e la crescita esplosiva di Internet, ha causato un rapido consumo degli indirizzi IPv4.

Difatti, sono stati introdotti gli indirizzi IPv6 (indirizzi non più a 32 bit, ma a 128 bit)

## 11.4 Routing IP

Il collegamento fra due router non avviene direttamente, ma attraverso una network (in realtà di solito una ***subnet***, come vedremo poi) che li collega, e che di fatto è costituita dalle due interfacce di rete e dalla linea di comunicazione che le collega:

Immagine che contiene nero, oscurità

Descrizione generata automaticamente

Ogni router possiede una tabella (costruita e mantenuta dinamicamente dall'algoritmo di routing in esercizio) che contiene elementi del tipo:

1. (this network number, host number) per ciascun host della network a cui il router è direttamente collegato;
2. (network number, 0) per ciascuna network lontana di cui il router conosce l'esistenza.

Associate a tali elementi ci sono le informazioni sull'interfaccia di rete da usare per instradare il pacchetto e, nel caso delle linee punto punto, l'indirizzo del router che si trova dall'altra parte.

Inoltre, viene mantenuto l'indirizzo di un ***default router*** (e la corrispondente linea seriale da usare per raggiungerlo) a cui inviare tutti i pacchetti destinati a network sconosciute.

Nell'esempio della figura precedente, il router X si comporta come segue:

* se arriva da fuori un pacchetto destinato a 150.1.10.1 il router, attraverso un elemento di tipo 1, scopre che deve inviarlo sulla LAN;
* se arriva dalla LAN un pacchetto per 150.2.10.3 e il router ha un elemento di tipo 2 quale (150.2., 0), allora invia il pacchetto (al router Y) sulla linea 1.

## 11.5 Subnet e Subnet Mask

Al fine di economizzare nel numero di network da usare (utilizzando al meglio quelle che possono contenere migliaia o milioni di host) una network può essere divisa in varie ***subnet***, ciascuna contenente i suoi host.

Questo è un fatto privato della network che viene suddivisa, e non ha bisogno di essere comunicato all'esterno.

Il meccanismo usato è di considerare, nell'indirizzo IP originario, l'host number come una coppia di valori: un ***subnet number*** e l'host number. Ciò avviene sulla base di una maschera di bit, detta ***subnet mask***, che deve essere unica per tutta la network e che delimita la parte di host number che viene usata come subnet number.

La subnet mask è una maschera che ha i bit ad 1 in corrispondenza del **net\_id** e 0 nell’**host\_id.**

A seconda dell'ampiezza del campo dedicato alla subnet, si possono ottenere molte subnet contenenti ciascuna pochi host oppure poche subnet che però potranno contenere molti host.

Nei router si aggiungono elementi del tipo:

* (this network number, this subnet number, host number) per gli host delle subnet a cui il router è collegato direttamente;
* (this network number, subnet number, 0) per le altre subnet a cui il router non è collegato direttamente;

con le relative informazioni sulle interfacce di rete da usare.

**ES: 141.14.0.0 (classe B) 🡪 mask (default) = 255.255.0.0**

**Immagine che contiene testo, schermata, Carattere, biglietto da visita

Descrizione generata automaticamente**

Fare l’AND bit a bit dell’indirizzo IP con la Maschera, corrisponde ad ottenere l’indirizzo della rete.

La subnet mask, quindi, permette di verificare se l’IP del destinatario appartiene o meno alla rete del mittente.

Se l’host del destinatario non è nella stessa sottorete, il pacchetto deve essere instradato verso il router (gateway).

## 11.6 Protocolli di Controllo

Assieme a IP esistono diversi protocolli per il controllo del funzionamento della subnet.

**ICMP (Internet Control Message Protocol, RFC**[**792**](https://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/rfc/rfc792.txt)**)**

L'operatività della subnet è controllata continuamente dai router, che si scambiano informazioni mediante messaggi conformi al protocollo ***ICMP*** (tali messaggi viaggiano dentro pacchetti IP).

Esistono molti tipi di messaggi, fra i quali:

* ***destination unreachable***: non si trova la destinazione del pacchetto. Viene inviato al mittente del pacchetto;
* ***time exceeded***: il contatore di un pacchetto è arrivato a zero. Viene inviato al mittente del pacchetto;
* ***redirect***: il router ha ragione di pensare che il pacchetto gli è arrivato per errore, ad esempio perché un host mobile si è spostato. Viene inviato al mittente del pacchetto;
* ***echo request, reply***: si vuole sapere se una destinazione è viva e raggiungibile. Si invia request, si aspetta reply;
* ***timestamp request, reply***: come il precedente, con in più la registrazione dell'istante di arrivo e partenza, per misurare le prestazioni della rete.

**ARP (Address Resolution Protocol, RFC**[**826**](https://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/rfc/rfc826.txt)**)**

Il protocollo ***ARP*** serve per derivare, dall'indirizzo IP dell'host di destinazione, l'indirizzo di livello data link (fisico) necessario per inviare il frame che incapsulerà il pacchetto destinato all'host di cui all'indirizzo IP.

Esso opera appoggiandosi direttamente sul livello data link e non su IP:

* viene inviata a tutte le stazioni della LAN, in data link broadcast, una richiesta del tipo: "chi ha l'indirizzo IP uguale a 151.100.17.102 ?"
* solo l'host che ha quell'indirizzo IP risponde, inserendo nella risposta il proprio indirizzo data link (MAC);
* per evittare la risoluziione continua IP 🡪 MAC, quando riceve la risposta, l'host la mantiene in memoria per circa 15 minuti (cache ARP).

Se l'indirizzo IP è relativo ad un'altra network:

* la soluzione più semplice è mandare il pacchetto ARP come prima, configurando però il router in modo che risponda alle richieste ARP relative ad altre reti fornendo il proprio indirizzo ethernet(***proxy ARP***); il router farà poi da tramite nella conversazione IP fra il mittente e il destinatario, inviando di volta in volta all'uno i pacchetti IP che gli giungono dall'altro;
* alternativamente, si configura l'host impostando al suo interno l'indirizzo ethernet di default (quello del router) a cui mandare i pacchetti IP per le altre reti; anche in questo caso il router deve fare da tramite nella conversazione IP fra il mittente e il destinatario.

**RARP (Reverse Address Resolution Protocol, RFC**[**903**](https://users.quipo.it/messina/scuola/sistemi/rfc/rfc903.txt)**)**

Il protocollo ***RARP*** risolve il problema inverso, cioè consente di trovare quale indirizzo IP corrisponda a un determinato indirizzo data link.

Esso è utile nel caso di stazioni senza disco, che al momento dell'avvio caricano l'immagine del codice binario del sistema operativo da un server.

Il vantaggio che si ottiene è che una sola immagine binaria va bene per tutte le stazioni: ogni stazione personalizza poi l'immagine binaria con la determinazione del proprio indirizzo IP mediante una richiesta RARP, nella quale invia il proprio indirizzo data link (che è cablato nell'interfaccia di rete).

## 11.7 Esercizio Subnetting

Immagine che contiene testo, schermata, Carattere, logo

Descrizione generata automaticamente

Supponiamo di voler creare, a partire dall’indirizzo di rete 193.205.7.0, 4 sottoreti.

Servono esattamente 2 bit, di conseguenza la **subnet mask sarà di 26 bit ad 1**

11111111.11111111.11111111.110000 🡪 rimangono 6 bit (2^6 = 64 host)

Quindi, attraverso questa subnet mask, saranno possibili 4 sottoreti, ognuna di 64host

Di questi 64, per ogni sottorete, vanno tolti i due indirizzi speciali che identificano l’indirizzo di sottorete e l’indirizzo di broadcast. Per tale motivo, gli host veicolabili saranno 62 (per ogni sottorete).

Immagine che contiene testo, schermata, Carattere, linea

Descrizione generata automaticamente

Immagine che contiene testo, uccello, schermata, Blu elettrico

Descrizione generata automaticamente

Per descrivere facilmente una subnet è possibile agire sulla scrittura dell’indirizzo ip.

Usiamo il numero di bit della maschera di rete per determinare la subnet:

193.205.7.0 ha una **4 sottoreti** con netmask 11111111.11111111.11111111.110000

Possiamo riscrivere gli indirizzi come:

193.205.7.0/26,

193.205.7.64/26,

193.205.7.127/26,

192.205.7.192/26

**Variable Length Subnet Mask (VSLM)**

E’ possibile dividere una subnet in più subnet. Creiamo diverse maschere di rete per ogni subnet.

Es.  
192.205.7.0/26 - 64 indirizzi (62 hosts + 2 rete/bc)

Dividiamo la sottorete in 2 ulteriori sottoreti, necessitiamo di **1 bit** ulteriore – rimangono **5 bit per gli hosts** (32 indirizzi)

Immagine che contiene testo, schermata, Carattere, linea

Descrizione generata automaticamente