

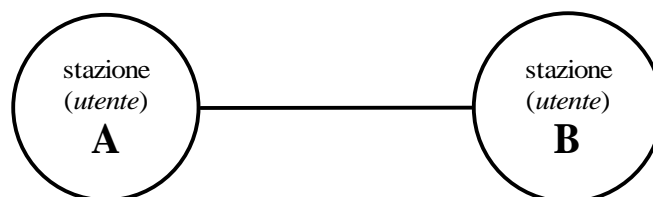
Appunti di Reti di Telecomunicazioni

Capitolo 5 - Protocolli di linea (parte II)

Introduzione ai protocolli di accesso multiplo	1
Generalità sui protocolli di accesso multiplo	5
Topologia delle reti locali.....	5
<i>Topologia a stella</i>	7
<i>Topologia ad anello</i>	8
<i>Topologia a dorsale</i>	12
<i>Considerazioni generali sulle topologie</i>	13
Protocollo ALOHA.....	14
<i>Analisi di efficienza per l' unslotted ALOHA</i>	17
<i>Ulteriori considerazioni sul protocollo</i>	20
Schema CSMA/CD.....	21
<i>Variante del CSMA/CD con centro stella</i>	24
<i>Analisi di efficienza</i>	26
<i>Reti locali di tipo Ethernet</i>	34
Tecnica del passaggio del token (token passing).....	38
<i>Analisi di efficienza</i>	40
Schema FDDI	41

INTRODUZIONE AI PROTOCOLLI DI ACCESSO MULTIPLO

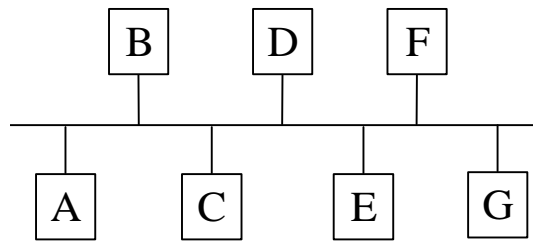
I *protocolli di linea* che abbiamo considerato nei paragrafi precedenti erano specificamente relativi a **connessioni punto-a-punto**, nelle quali cioè si considerano due sole stazioni, A e B, connesse tramite una linea di trasmissione:



Generica connessione punto-a-punto tra due stazioni

In questo contesto, si trattava solo di analizzare le tecniche con cui le due stazioni devono scambiarsi i dati ed il problema principale era quello di ottimizzare l'uso della risorsa di comunicazione assegnata alle due stazioni.

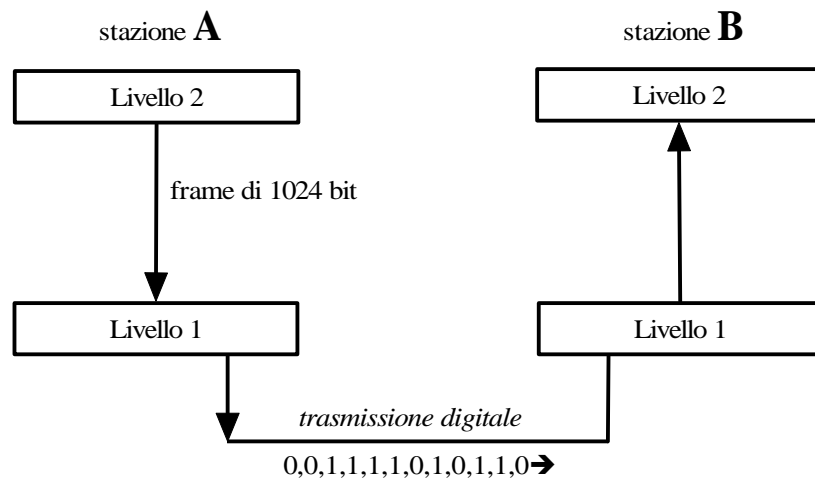
Il problema invece si complica quando abbiamo più stazioni che devono comunicare tra loro e, per farlo, hanno a disposizione un'unica risorsa trasmissiva. Un esempio banale può essere una rete fatta nel modo seguente:



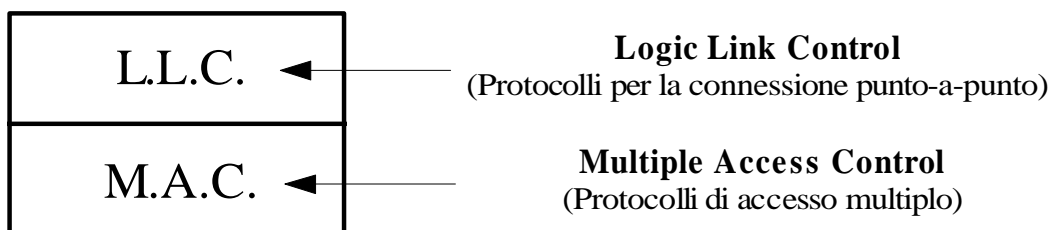
Topologia di rete a dorsale

Come diremo tra poco, questa è una rete cosiddetta **a dorsale**: c'è un unico mezzo trasmissivo (tipicamente su cavo), cui sono connesse un certo numero di stazioni. Dato che il mezzo trasmissivo accetta una sola trasmissione per volta, è necessario stabilire con quali criteri una data stazione può acquisire il diritto a trasmettere, prevalendo sulle altre.

A questo scopo, riprendiamo per un attimo lo schema generale di due stazioni connesse secondo il *modello di riferimento ISO-OSI*, limitandoci solo ai due livelli più bassi (livello 1 per l'*interfaccia fisica* e livello 2 per i *protocolli di linea*):

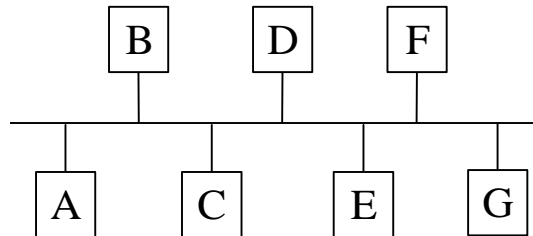


Nei discorsi precedenti, abbiamo considerato, per quanto riguarda il livello 2, solo i protocolli di linea (*stop-and-wait, go-back-n, selective repeat*) che gestiscono la comunicazione tra le due stazioni, una volta che sia assegnata loro una linea fisica di comunicazione. A questi protocolli dobbiamo adesso affiancarne altri, necessari per gestire il problema dell'**accesso multiplo**, ossia appunto il fatto che più stazioni vogliono accedere ad un unico mezzo trasmissivo. Possiamo allora dividere il livello 2 in due sottolivelli:

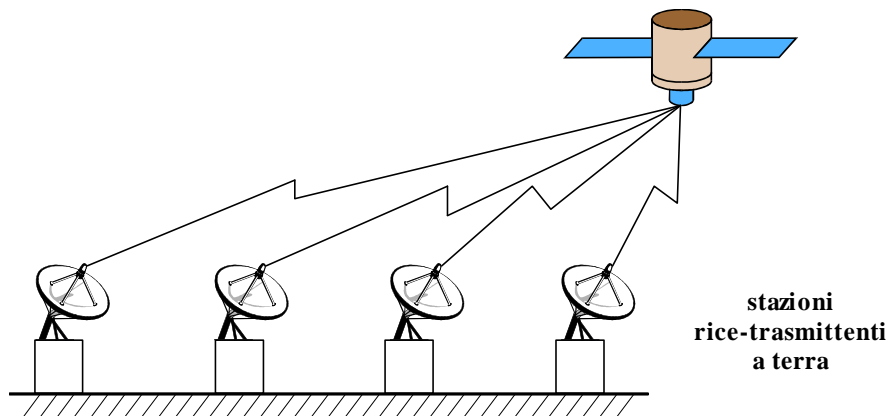


Come evidenziato dalla figura, il **sottolivello LLC** è quello che si occupa delle connessioni punto-a-punto tra due stazioni, mentre invece il **sottolivello MAC** si occupa della gestione dell'accesso multiplo all'unico mezzo trasmissivo a disposizione delle varie stazioni.

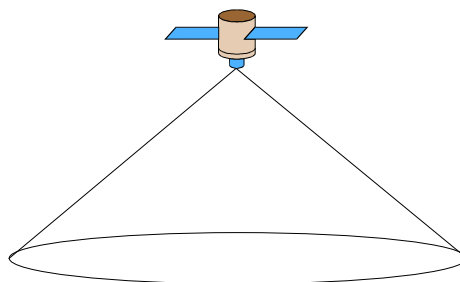
Il problema di avere un unico mezzo trasmissivo a disposizione di più utenti si presenta in situazioni anche abbastanza eterogenee tra loro. Il caso tipico è quello considerato prima, di una rete basata su cavo (quindi un mezzo trasmissivo di tipo passa-basso), che generalmente non necessita di tecniche di modulazione e quindi di *segnali portanti*, nel quale si trasmette in **banda base**:



Non si tratta però dell'unico caso possibile. Infatti, il discorso vale anche quando il mezzo trasmissivo è di tipo passa-banda, come nel caso di un *collegamento radio*. Per esempio, pensiamo ad un collegamento tra un certo numero di **stazioni rice-trasmittenti terrestri** ed un **satellite**:



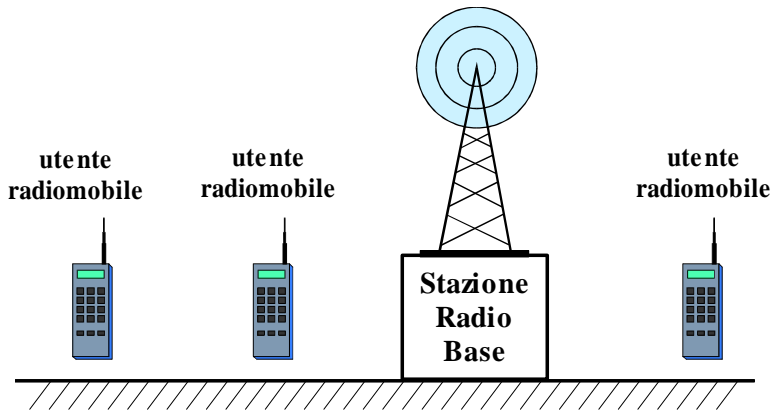
Supponiamo che il satellite metta a disposizione delle stazioni un solo canale radio in trasmissione (verso il satellite) ed un solo canale radio in ricezione (verso le stazioni), situati su frequenze centrali diverse (sia per evitare interferenze sia per problemi tecnologici relativi alle antenne rice-trasmittenti posizionate sul satellite). Anche se le stazioni a terra possono non essere visibili le une alle altre, il satellite le “vede” tutte quante, dato che sono situate tutte nel suo **cono di visibilità**:



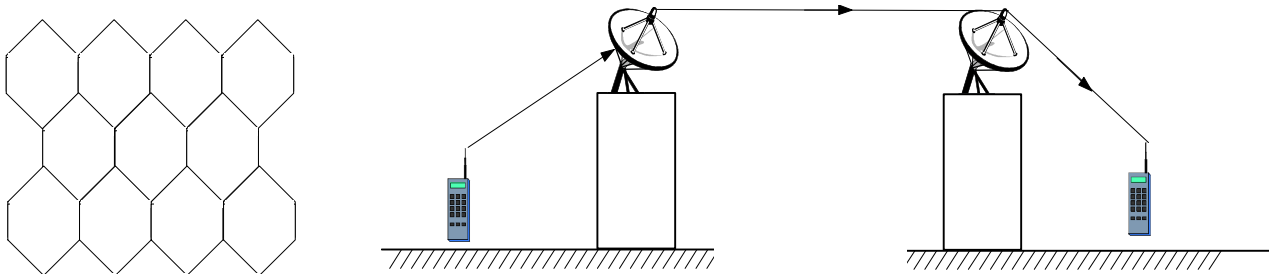
Quindi, non si può pensare che ogni stazione trasmetta appena ne ha bisogno, in quanto i vari segnali si sovrapporrebbero (dato che hanno la stessa frequenza) risultando poi indecifrabili per il

satellite. Bisogna regolamentare l'ordine con cui le stazioni trasmettono, privilegiandone una per volta.

Notiamo che il discorso appena fatto non vale solo per un collegamento via satellite, ma in generale per un qualsiasi **collegamento radio** in cui più stazioni trasmettono e ricevono verso e da un'unica stazione centrale, che poi provvede allo smistamento dei messaggi:



In questa schematizzazione rientra ad esempio il *sistema di telefonia cellulare GSM*: il territorio su cui si vuole garantire la *copertura* (cioè la possibilità per gli utenti di comunicare tra loro) viene suddiviso in tante **celle** (che in prima approssimazione possono essere viste come zone di forma *esagonale*); ciascuna cella è "servita" da una stazione centrale, detta **stazione radio base**: un qualsiasi utente (con il proprio *apparato mobile*) che si trovi in una cella, comunica direttamente (via radio) con la *stazione radio base* di quella cella, la quale stazione instrada i dati (la voce) verso la stazione radio base cui è connesso l'altro interlocutore:



In questo caso, la risorsa di comunicazione è l'etere ed in particolare un preassegnato set di frequenze. Ogni *operatore mobile* (TIM, Omnitel, Wind, Blutel) dispone di una certa banda, nella quale far transitare le comunicazioni dei propri utenti. Questa banda viene divisa in un certo numero di sottobande (*canali*), tutte di uguale ampiezza (**200 kHz** nel caso del GSM), ciascuna da adibire ad una conversazione: il numero di canali si ottiene evidentemente dividendo la banda totale a disposizione per l'ampiezza della generica sottobanda. Ciò significa, sostanzialmente, che il criterio con cui concedere l'accesso degli utenti alla risorsa di comunicazione è di tipo **FDM** (Frequency Division Multiplexing), ossia una tecnica a *divisione di frequenza*. In realtà, la cosa risulta un po' più complicata, in quanto alla tecnica FDM si aggiunge anche una tecnica **TDM** (Time Division Multiplexing, a *divisione di frequenza*), in base alla quale il generico utente accede alla sottobanda assegnatagli non con continuità, ma ad intervalli di tempo regolari (che sono talmente ravvicinati da non essere distinguibili dall'utente stesso). La sovrapposizione del TDM alla tecnica FDM serve solo ad aumentare il numero di utenti che, in ciascuna cella, è possibile servire contemporaneamente.

Questo esempio contribuisce dunque a chiarire una volta di più *quanto critico sia il progetto dei protocolli per la gestione dell'accesso ad un'unica*

risorsa trasmissiva da parte di più utenti (stazioni). Ancora una volta, l'obiettivo essenziale da porsi è quello di ottimizzare l'uso della risorsa trasmissiva e, allo stesso tempo, garantire una equa ripartizione dell'accesso a tutte le stazioni¹.

GENERALITÀ SUI PROTOCOLLI DI ACCESSO MULTIPLO

Dovendo gestire l'accesso di più stazioni ad un'unica risorsa trasmissiva, si può farlo sostanzialmente in due modi:

- il primo modo è quello dei **protocolli ad accesso multiplo casuale**: genericamente, una rete che funzioni con questo tipo di protocolli prevede che una stazione, appena abbia qualcosa da trasmettere, acceda immediatamente al canale, disinteressandosi del fatto che il canale poteva essere già occupato; se il canale era già occupato, dato che la trasmissione della stazione va inevitabilmente a sovrapporsi (fenomeno della **collisione**) alla trasmissione che già era in corso, entrambe le trasmissioni risultano indecifrabili.

Questo è evidentemente un caso estremo. Più realisticamente, si può invece pensare di imporre ad una stazione di "osservare" il canale prima di trasmettere e di trasmettere solo se il canale risulta libero; in questo caso, le collisioni, pur essendo possibili (vedremo in quali casi), sono sicuramente ridotte: si avrà collisione, ad esempio, quando due stazioni tentano contemporaneamente di accedere al canale (esse lo vedono libero e quindi trasmettono, senza sapere che qualcun altro sta facendo la stessa cosa e quindi i dati andranno persi) oppure quando una stazione A "osserva" il canale e lo vede libero solo perché il segnale già inviato da un'altra stazione B non è arrivato ancora al punto in cui A è connessa;

- il secondo modo è invece quello dei **protocolli ad accesso multiplo ordinato**: in questo caso, le collisioni vengono del tutto evitate semplicemente ordinando l'accesso, ossia stabilendo un preciso criterio per cui ciascuna stazione viene autorizzata a trasmettere solo in dati momenti, nei quali ovviamente nessun'altra sta trasmettendo.

Come vedremo, queste sono caratteristiche solo generali dei vari protocolli, in quanto le varianti storicamente proposte (alcune standardizzate e diffuse con successo, altre standardizzate ma senza riscontrare grande diffusione) sono parecchie.

TOPOLOGIA DELLE RETI LOCALI

Prima di addentrarci nello studio dei singoli protocolli di accesso multiplo, è opportuno fare una panoramica delle principali topologie di rete. A tal proposito, diamo subito la seguente definizione: *prende il nome di **topologia di rete** la configurazione geometrica dei collegamenti tra le varie stazioni (in generale i vari componenti) della rete.*

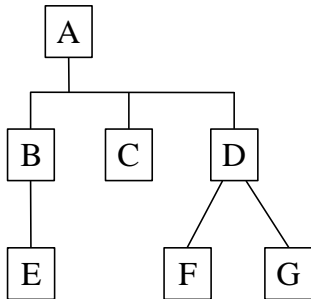
La topologia di una rete di telecomunicazioni rappresenta una delle scelte fondamentali nella progettazione della rete stessa, specialmente se si tratta di una rete locale (LAN). La topologia determina infatti le dimensioni e la "forma" di una rete, con particolare riferimento al numero massimo di stazioni collegabili, al numero di linee di interconnessione ed alla lunghezza

¹ Ci sono, d'altra parte, casi in cui le stazioni considerate non producono, mediamente, lo stesso carico informativo da trasmettere sul canale, per cui la ripartizione del canale può essere pensata in modo da privilegiare le stazioni con maggiore attività. Questo è, per esempio, quello che accade per le reti gestite con la tecnica del cosiddetto **token ring con priorità**.

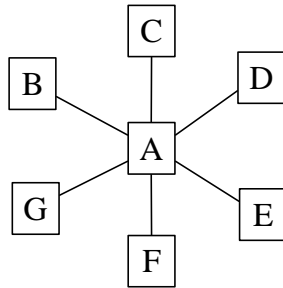
complessiva del cavo utilizzato. La topologia influenza inoltre i costi, l'affidabilità, l'espandibilità e la complessità della rete.

Ci sono essenzialmente 5 tipi di tipologie di rete, rappresentate nella figura seguente, ed un numero piuttosto grande di varianti:

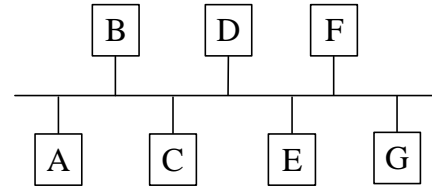
Struttura ad **albero** (*tree*)



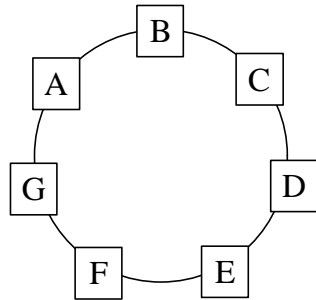
Struttura a **stella** (*star*)



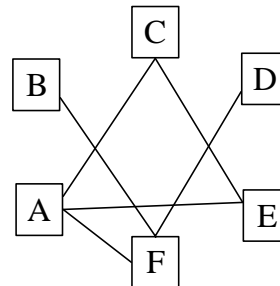
Struttura a **dorsale** (*bus*)



Struttura ad **anello** (*ring*)



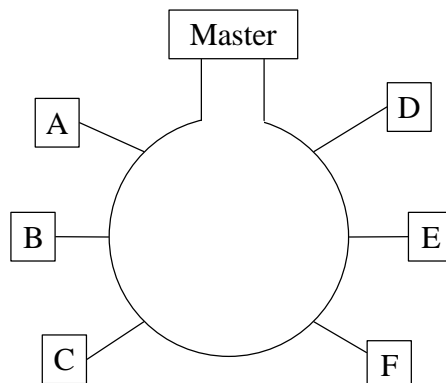
Struttura a **maglia**



Principali topologie di rete

Tra tutte le tipologie, come vedremo, tre hanno avuto ampia accettazione di mercato: sono le strutture a stella, ad anello e a dorsale. Accettazione anche buona c'è stata per la topologia ad albero. Per quanto riguarda, invece, la struttura a maglia, essa è tipicamente usata solo nelle reti geografiche (**WAN**), per le quali si usa talvolta una particolare configurazione, il **loop**, molto simile a quella ad anello:

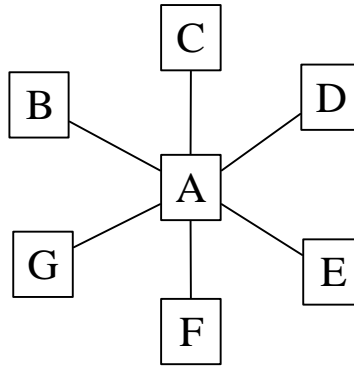
Struttura a **loop**



Come si nota dalla figura, esiste una fondamentale differenza tra il loop e l'anello: nel loop vi è normalmente una stazione master, assente invece nell'anello, e le stazioni sono completamente passive, mentre invece vedremo nell'anello sono attive.

Topologia a stella

Consideriamo per prima la topologia a stella:



Topologia di rete a stella

Tutte le stazioni sono collegate ad una stazione centrale (**centro-stella**) e tali connessioni sono di tipo punto-a-punto². Si adotta una scelta di questo tipo tipicamente quando si vuole mantenere un controllo centrale di tutte le connessioni tra coppie di interlocutori.

Tipici esempi di topologie di questo tipo sono le centrali telefoniche o i sistemi di smistamento messaggi.

I vantaggi della topologia a stella sono essenzialmente i seguenti:

- *alte prestazioni*: essendo i collegamenti di tipo punto-a-punto, non c'è mai contesa sul mezzo trasmissivo, il quale quindi, a differenza di altre soluzioni, è praticamente sempre disponibile per una stazione che voglia trasmettere;
- *semplicità di protocollo*, per lo stesso motivo di cui al punto precedente;
- *facilità di controllo*: il controllo è tutto concentrato (centralizzato) in un unico punto della rete, che è appunto il *centro stella*;
- l'eventuale andata fuori uso di una stazione (che non sia ovviamente il centro stella) non ha alcuna influenza sul funzionamento della rete.

A fronte di questi vantaggi, ci sono i seguenti svantaggi:

- in caso di intenso traffico, il nodo centrale può risultare sovraccaricato di lavoro e questo potrebbe portare al blocco delle richieste di connessione. Questo rischio può anche essere accettato nel sistema telefonico, ma non può esserlo di certo in una rete di trasmissione dati;

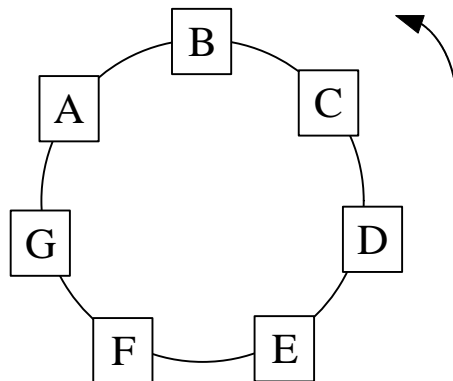
² Il che significa che su ciascuna linea di connessione stazione-centro sono applicabili protocolli di linea del tipo *stop-and-wait* oppure *go-back-n* oppure *selective repeat*.

- analogamente, l'affidabilità dell'intero sistema dipende tutta dall'affidabilità del componente centrale: si parla di **single point of failure**, nel senso appunto che l'andata fuori servizio del componente centrale compromette il funzionamento dell'intera rete.

Essenzialmente, possiamo affermare che il pregio principale di questa topologia è nel controllo centralizzato. Proprio per questo, vedremo che *reti locali basate su altri tipi di topologie, mantengono tali topologie solo a livello logico, mentre a livello fisico le connessioni rispettano comunque una topologia a stella*.

Topologia ad anello

Nella topologia ad anello, tutte le stazioni sono collegate in una caratteristica configurazione circolare, chiusa su se stessa, nella quale le stazioni sono tra loro collegate tramite linee punto-a-punto:



Topologia di rete ad anello

La trasmissione avviene in un unico senso, ad esempio quello antiorario indicato in figura.

Tutte le stazioni prendono parte alla trasmissione: quando una stazione invia sulla linea il proprio pacchetto, questo percorre l'intero anello, in quanto ciascuna stazione riceve il pacchetto, lo memorizza, lo rigenera e lo ritrasmette sulla linea successiva.

Proprio il fatto per cui ogni stazione provvede a rigenerare il segnale, l'anello può avere anche una elevata estensione. Al contrario, i limiti di estensione riguardano la distanza massima tra stazione e stazione.

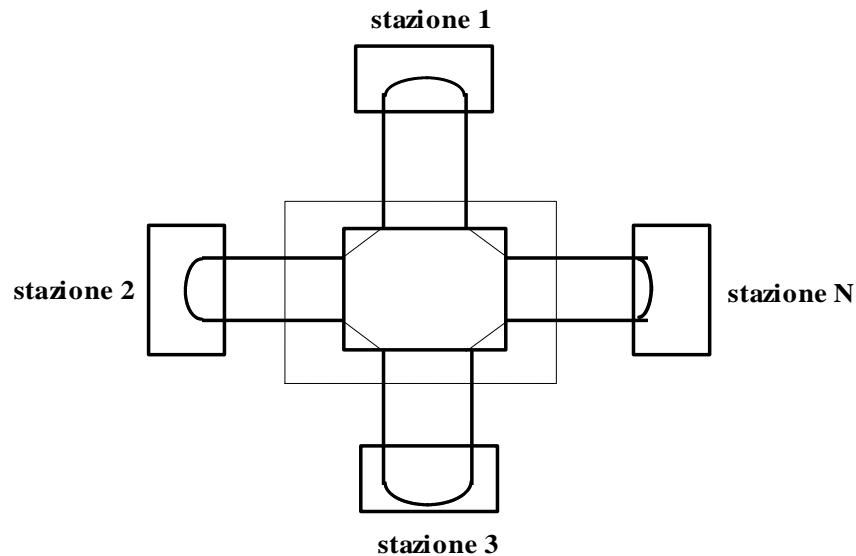
Questa soluzione si rivela ottima se vengono usate le **fibre ottiche** (che sono notoriamente mezzi trasmissivi unidirezionali).

Il numero di stazioni può variare da poche decine fino a migliaia di unità.

Gli svantaggi fondamentali sono i seguenti:

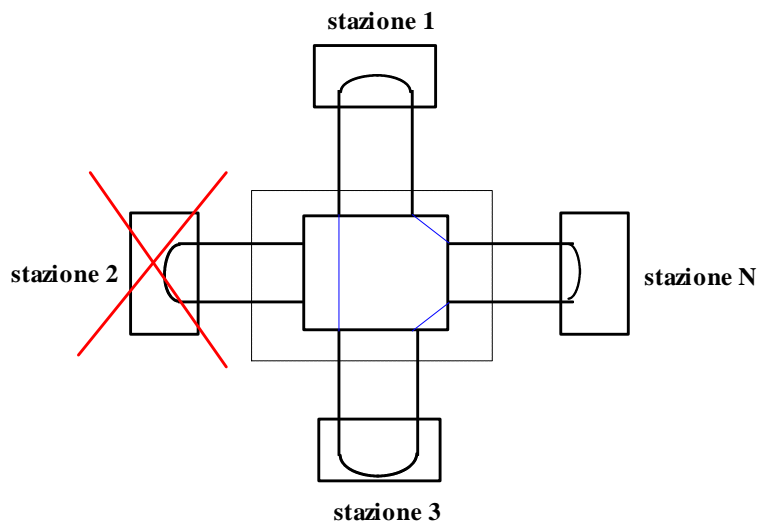
- la lunghezza complessiva del cavo non è minimizzata;
- l'affidabilità dell'intero sistema è critica (a meno di accorgimenti speciali che vedremo): la caduta o il malfunzionamento di una singola stazione o di una linea provoca la caduta dell'intera rete;
- l'inserimento di una eventuale nuova stazione rende necessario interrompere il funzionamento dell'intera struttura.

I problemi principali sono proprio gli ultimi due, ossia l'affidabilità e l'inserimento di nuove stazioni. Per eliminare entrambi questi problemi si può adottare il seguente accorgimento: si inserisce, nell'anello, un **centro di commutazione** (detto **relay**), al quale si connettono tutte le stazioni:



Topologia ad anello con centro di connessione centrale: il centro di connessione è connesso a ciascuna stazione con un cavo di andata ed uno di ritorno; in caso di caduta di una stazione, all'interno del centro di connessione si usano appositi circuiti che escludono la stazione stessa dall'anello, mantenendo quest'ultimo perfettamente funzionante

Così facendo, la configurazione ottenuta è ad anello solo a livello logico, ma invece è a stella a livello fisico. Questo risolve il problema dell'affidabilità: infatti, il centro ha la capacità di mettere fuori rete una qualsiasi stazione, usando appositi circuiti elettrici:



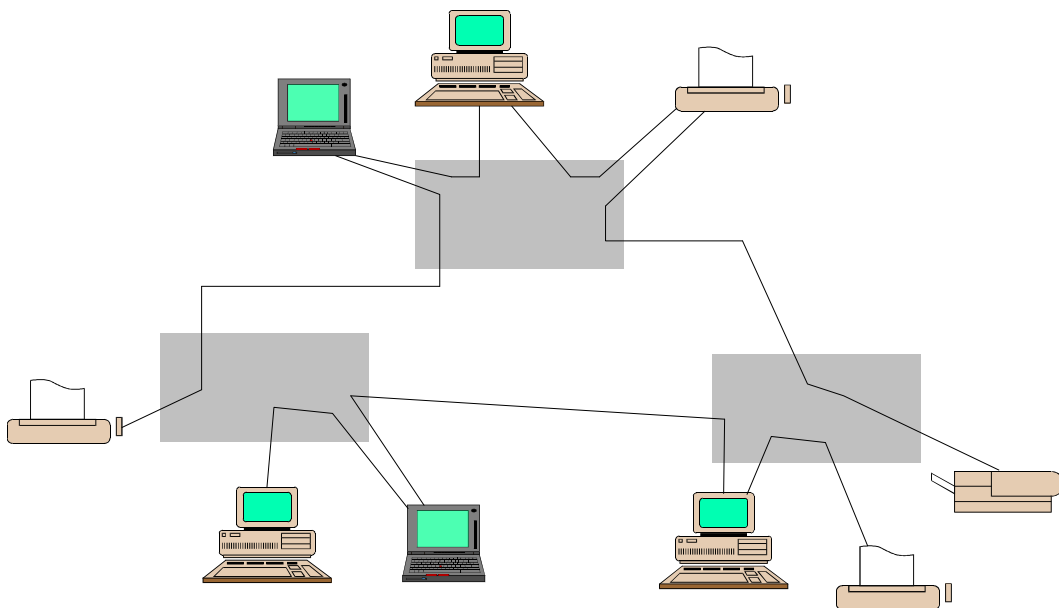
Esempio di funzionamento del centro di connessione: nel caso la stazione 2 dovesse interrompere il proprio funzionamento, il centro di connessione modifica i collegamenti al suo interno in modo da connettere direttamente la stazione precedente e quella successiva della stazione fuori uso. In tal modo, le stazioni ancora in funzione non si accorgono di niente

In caso di guasto o spegnimento di una determinata stazione, il relay disinserisce dall'anello il relativo cavo di giunzione tra centro e stazione (detto **lobo**), in modo da ricostruire l'anello senza la stazione.

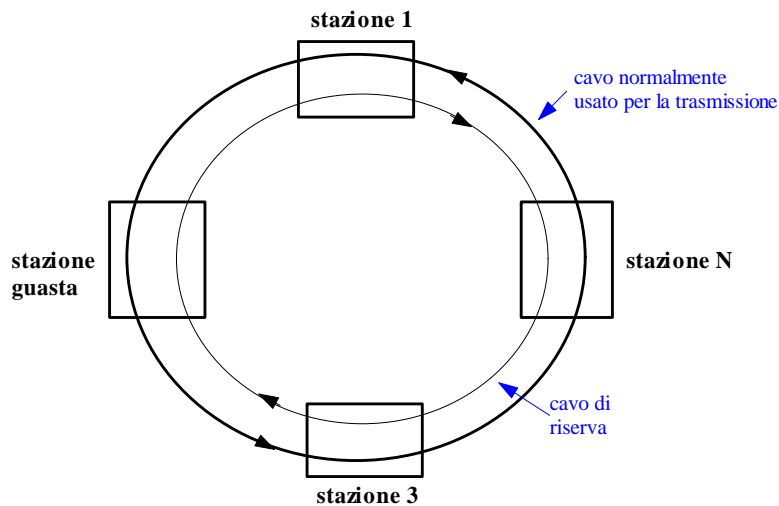
Da notare che i relay possono essere attivati e disattivati dalle stazioni stesse: una stazione che volesse staccarsi temporaneamente dalla rete, manda un *segnale elettrico di inizializzazione*, il quale fa scattare il relativo circuito nel centro di connessione, escludendo la stazione dall'anello; quando la stazione vuole rientrare, procede in modo analogo, inviando un segnale che riporti la configurazione nella situazione originale, reinserendo cioè la stazione stessa.

Uno svantaggio che appare subito evidente è che la lunghezza complessiva del cavo praticamente si raddoppia.

Talvolta, può capitare che si debbano connettere alla rete più stazioni di quante il centro di connessione possa gestire. In questo caso, si può far uso di più elementi centrali, tra loro collegati come nella figura seguente:

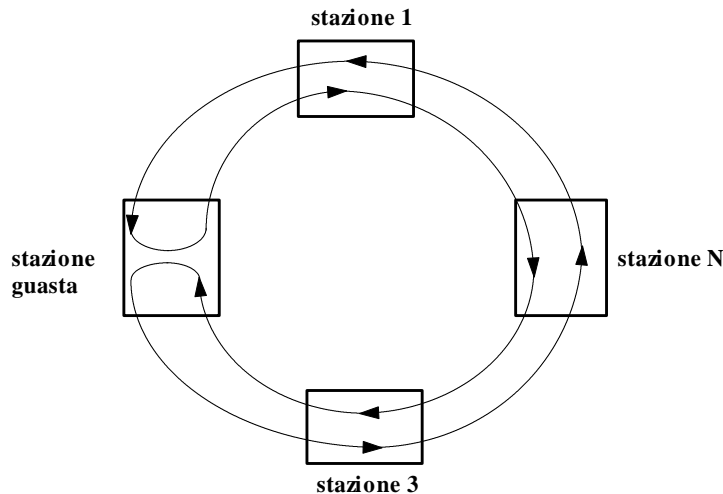


C'è anche un diverso approccio con cui risolvere il problema dell'affidabilità dell'anello, approccio che non prevede l'uso di un nodo centrale. *Esso consiste nel realizzare la connessione tra le stazioni non più con un unico cavo, ma con un doppio cavo*, secondo uno schema del tipo seguente:

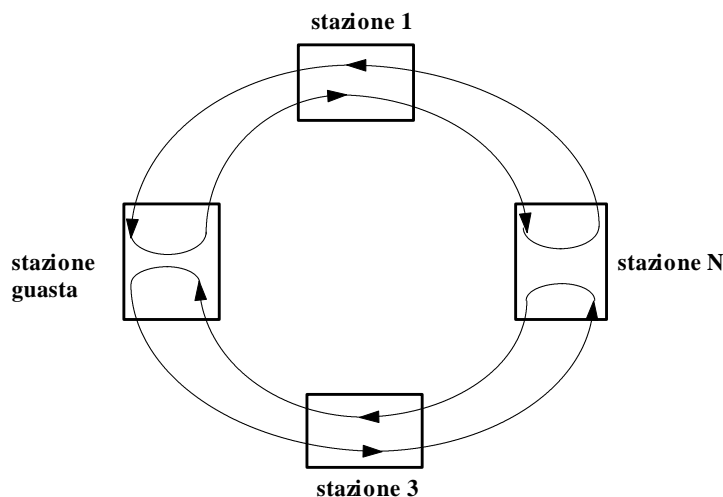


I due cavi sono entrambi monodirezionali ed uno solo di essi viene normalmente usato per la trasmissione (ad esempio quello che in figura è stato disegnato con maggiore spessore). L'altro, di riserva, permette la comunicazione in verso opposto.

Se una data stazione, ad esempio la numero 2, si guasta o viene volontariamente spenta, i due cavi vengono automaticamente connessi all'interno della stazione stessa, in modo da ricostruire l'anello logico grazie al cavo riserva:



Ancora una volta, lo svantaggio fondamentale è nel fatto che la lunghezza complessiva dei cavi è raddoppiata rispetto alla semplice topologia ad anello. Oltre a questo, è chiaro che, in caso di caduta di due o più stazioni, si formano anelli parziali fra loro non connessi. Ad esempio, se si guastano sia la stazione 2 sia la stazione N, succede quando segue:



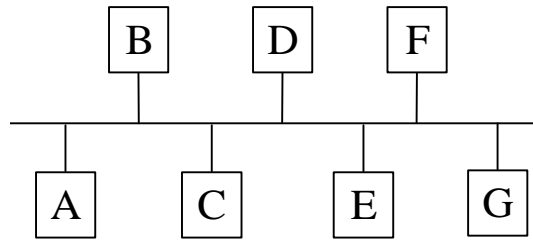
Si sono formati due anelli, che però non sono connessi tra di loro.

Per ovviare a questo problema, vedremo che le **reti token-ring** e le **reti FDDI** usano insieme l'accorgimento del doppio anello e quello del centro stella.

Il metodo del doppio anello può essere chiaramente utilizzato anche quando, come abbiamo visto prima, la rete è formata da più centri di interconnessione, a ciascuno dei quali sono collegate un certo numero di stazioni. In questo caso, il doppio anello si usa per connettere i centri di interconnessione. *Il vantaggio, in questo caso, è che, essendo i centri di interconnessione delle stazioni puramente passive, il rischio di andata fuori servizio è molto basso, per cui è anche molto basso il rischio di formazione di anelli parziali del tipo visto nell'ultima figura.*

Topologia a dorsale

Nella topologia a dorsale (adottata dalle reti locali di tipo **Ethernet**), c'è un unico cavo che si estende su tutta l'area in cui sono situate le stazioni:



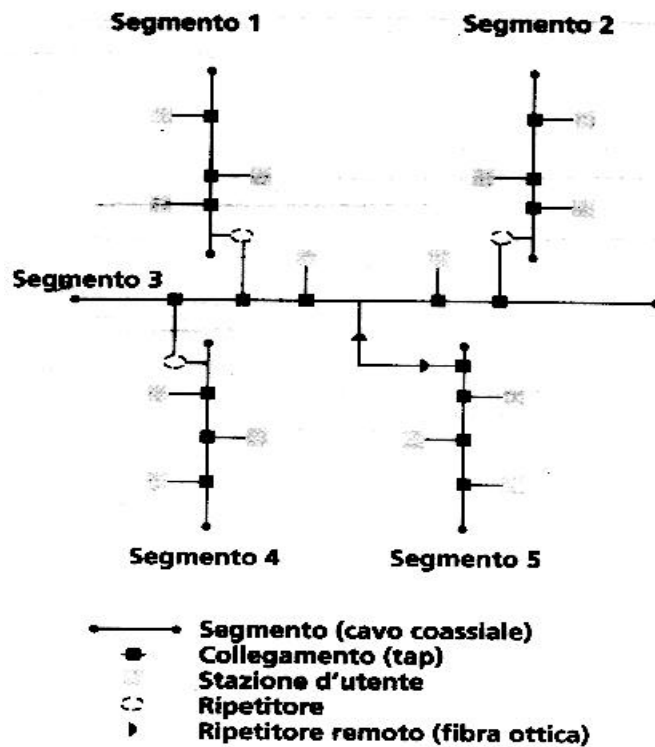
Topologia di rete a dorsale

I dati viaggiano sul cavo e sono quindi leggibili da parte di tutte le stazioni. Quindi, la trasmissione di una stazione viene ricevuta da tutte le altre, nonostante possa esser in realtà diretta ad una sola stazione destinataria.

I maggiori vantaggi consistono nella semplicità, nei bassi costi e nell'affidabilità di questa topologia. Non solo, ma è evidente che il guasto di una qualsiasi stazione non provoca la disattivazione dell'intera rete, dato che le stazioni sono passive quando non trasmettono, al contrario di quanto abbiamo visto nel caso della topologia ad anello (nella sua forma più semplice), dove invece ciascuna stazione deve ricevere, rigenerare e ritrasmettere ogni pacchetto.

E' molto facile anche inserire nuove stazioni su cavo.

Oltre ad aggiungere nuove stazioni, si può anche pensare di collegare varie dorsali, dette in questo caso **segmenti**, secondo uno schema del tipo seguente:



In questa figura, abbiamo una rete formata da 5 segmenti; si distinguono allora una serie di "entità":

- in primo luogo, a ciascun segmento sono collegate (tramite i cosiddetti **tap**) un certo numero di stazioni d'utente;
- anche il collegamento tra segmenti è effettuato tramite tap, il che significa che un segmento vede un altro segmento come semplicemente una stazione d'utente; la differenza tra un collegamento segmento-stazione ed un collegamento segmento-segmento è nel fatto che, in quest'ultimo, è presente un **ripetitore**, allo scopo di aumentare la potenza del segnale prima di fornirlo alle varie stazioni connesse. Il motivo è chiaramente nell'inevitabile attenuazione subita dal segnale durante la propagazione;
- i ripetitori possono essere dei semplici *amplificatori elettronici* nel caso di usi, come mezzo trasmissivo, un doppino telefonico oppure un cavo coassiale, ma possono anche essere qualcosa di più complesso se si usano, per collegare i segmenti, delle fibre ottiche: in questo caso, il segnale elettrico prelevato da un segmento viene prima convertito in segnale ottico, poi trasmesso sulla fibra ottica ed infine riconvertito in segnale elettrico da immettere sul nuovo segmento. Servono dunque dispositivi di **conversione elettro-ottica** dei segnali;
- infine, alle estremità di ciascun segmento è necessario sistemare un adattatore di impedenza (detto anche **tappo**) che realizzi l'adattamento perfetto e quindi impedisca la riflessione del segnale.

Concludendo, i principali inconvenienti di una rete a dorsale sono i seguenti:

- i potenziali problemi di prestazioni dovuti al fatto che unico cavo serve tutte le stazioni: le prestazioni possono peggiorare quando il carico trasmissivo delle stazioni è elevato;
- una eventuale interruzione del cavo mette fuori uso l'intera rete;
- la mancanza di punti di concentrazione rende difficoltosa l'individuazione di eventuali punti di malfunzionamento;
- dato che le stazioni sono puramente passive, le distanze raggiungibili sono piuttosto ridotte anche con segnali di buon livello, a meno ovviamente di far uso dei ripetitori, che risolvono il problema a prezzo però di maggiori spese.

Generalmente, le LAN a dorsale supportano da alcune decine fino al massimo di un migliaio di stazioni.

Considerazioni generali sulle topologie

Abbiamo dunque visto che ogni topologia ha caratteristici punti di forza e di debolezza. La scelta della topologia va pertanto fatta tenendo presente fondamentalmente l'affidabilità, l'espandibilità, la complessità dell'installazione, le possibilità di controllo, i costi, l'ampiezza di banda disponibile.

Le configurazioni ad anello ed a stella appaiono come quelle più vulnerabili a causa della ripercussione sull'intera rete della caduta, rispettivamente, della stazione singola o del nodo centrale, mentre la soluzione a dorsale non sembra presentare questo rischio. In realtà, abbiamo osservato sia che esistono opportuni accorgimenti atti a risolvere i problemi delle reti ad anello ed a stella sia che anche la soluzione a dorsale cessa di funzionare nel momento in cui si verifica una interruzione del cavo.

In generale, quindi, *possiamo affermare che ogni topologia presenta i propri inconvenienti, ma è sempre possibile pensare ad accorgimenti che risolvano tali inconvenienti*. Naturalmente, l'implementazione pratica di questi accorgimenti potrà poi risultare più o meno conveniente, soprattutto da un punto di vista economico.

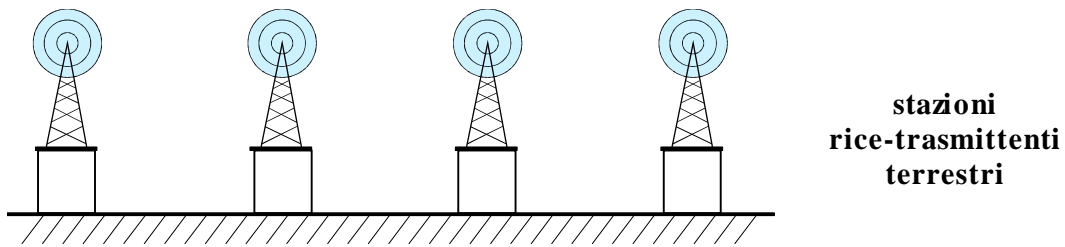
A proposito degli aspetti economici, un elemento cui si è dato in passato una certa rilevanza è il costo dei cavi; tuttavia, grazie alla progressiva diminuzione dei prezzi, questo aspetto è attualmente di secondo piano.

Osserviamo inoltre che *le strutture ad anello ed a stella sono quelle che si prestano maggiormente a collegamenti ad alta o altissima velocità, grazie al fatto che esse utilizzano solo collegamenti punto-a-punto*. Disponendo di mezzi trasmissivi idonei (tipicamente le **fibre ottiche**), le velocità di trasmissione raggiungibili sono molto elevate. D'altra parte, se consideriamo una struttura a stella con collegamenti punto-a-punto ad altissima velocità, appare evidente che le elevate prestazioni sono raggiungibili solo se il centro stella ha una elevata velocità di commutazione; in caso contrario, se cioè il centro stella fosse lento, l'alta velocità con cui le stazioni scambiano i dati con il centro stella verrebbe compensata dalla bassa velocità con cui il centro stella smista i dati sulle varie linee.

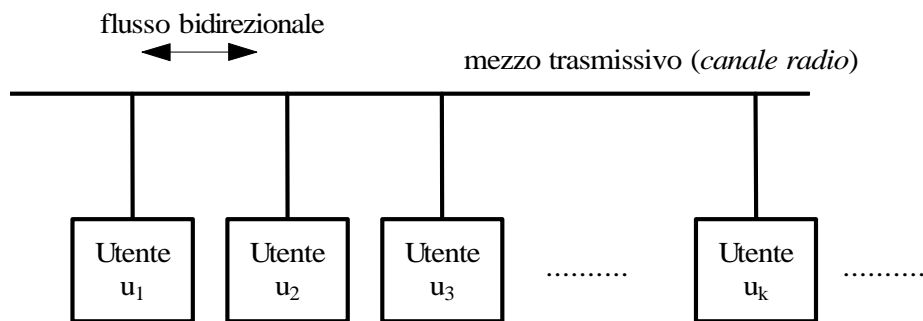
PROTOCOLLO ALOHA

Cominciamo l'analisi dei protocolli di accesso multiplo con un esempio di protocollo di accesso casuale, nel quale cioè non venga stabilito alcun ordine particolare con cui le varie stazioni devono accedere all'unica risorsa trasmissiva disponibile.

Consideriamo perciò una rete di telecomunicazione basata sul cosiddetto **protocollo ALOHA**. Questa è una tecnica che deriva da una rete per la trasmissione dati via radio, sviluppata dall'Università delle Hawaii (da cui il nome *ALOHA*), all'inizio degli anni '70:



Il mezzo trasmissivo è dunque l'atmosfera: in particolare, i dati vengono inviati sulle **frequenze UHF** (vale a dire frequenze comprese nell'intervallo 300÷3000 MHz) utilizzando il classico schema a **pacchetti** (di lunghezza fissa). In particolare, tutte le stazioni accedono all'unica banda di frequenza disponibile, il che equivale ad avere un mezzo trasmissivo generico nel quale sia tollerabile una trasmissione per volta:



Quando una stazione emette un messaggio (cioè un singolo pacchetto di bit o un insieme di pacchetti), questo messaggio, se la trasmissione va a buon fine, viene ricevuto indistintamente da tutte le stazioni (cosa che, in figura, è stata indicata con la freccia a due punte, indicante appunto un *flusso bidirezionale* dei dati sul mezzo trasmissivo). Ciascuna stazione, una volta ricevuto il generico pacchetto, esamina l'indirizzo del destinatario: se si riconosce in tale indirizzo³, compie sul pacchetto le necessarie elaborazioni, altrimenti lo scarta visto che non le interessa.

C'è evidentemente il problema per cui, se due stazioni trasmettono contemporaneamente o, comunque, se una stazione trasmette quando già un'altra lo sta facendo, i due messaggi, essendo allocati sulle stesse frequenze, si sovrappongono e diventano indecifrabili: quando questa situazione si verifica, si dice che c'è stata una **collisione**.

Proprio perché fa parte dei *protocolli ad accesso multiplo casuale*, il protocollo ALOHA non prevede niente di particolare per evitare le collisioni. La tecnica è detta infatti, in gergo, "*trasmetti e prega*": essa prevede che, appena una stazione debba trasmettere, lo faccia immediatamente, a prescindere da quello che stanno facendo le altre stazioni; se, nel frattempo, un'altra stazione sta trasmettendo a sua volta, si verifica la collisione.

Ciascuna stazione che abbia inviato un proprio messaggio sul canale, per sapere quale sia stato l'esito della propria trasmissione, non può fare altro che aspettare la *risposta di avvenuta ricezione* da parte dei propri destinatari; se si è verificata una collisione, è ovvio che i destinatari non hanno ricevuto niente di decifrabile e quindi non hanno inviato alcuna risposta. La generica stazione mittente, quindi, non ricevendo alcuna risposta dai destinatari, capisce che è avvenuta una collisione. A questo punto, essa aspetta un *periodo casuale di tempo* e poi ritenta la trasmissione. Il motivo per cui il tempo di attesa, prima del nuovo tentativo, deve essere casuale è evidente: se due stazioni, che hanno colliso, hanno cessato la propria trasmissione nello stesso istante e poi aspettano lo stesso tempo prima di riprovare, ricadrebbero in una nuova collisione; al contrario, se ciascuna stazione sceglie un tempo casuale di attesa, la probabilità di collisione è di gran lunga ridotta.

Appare evidente che, anche in questo caso, il protocollo non possa prescindere dall'uso di un **time-out**: dato che ogni stazione deve aspettare un riscontro dal destinatario del proprio messaggio e data la possibilità che, per vari motivi, questo riscontro non arrivi, si predispona un time-out, scaduto il quale la stazione mittente, non avendo ricevuto riscontro, ripete la trasmissione.

Abbiamo dunque capito che ogni stazione trasmette non appena ne ha l'esigenza, salvo poi controllare l'esito. Questo schema comporta quindi un accesso immediato alla trasmissione, il che si traduce in un carico di dati di controllo minimo (ogni pacchetto dovrà contenere, oltre ai dati utente, solo l'indirizzo del destinatario e i codici di controllo di errore) e hardware estremamente semplice, visto che non ci sono controlli di sorta da effettuare (ad esempio, al contrario di altri protocolli che vedremo in seguito, le stazioni non hanno bisogno di alcun hardware per monitorare il canale, ossia per verificare se esso è occupato oppure no).

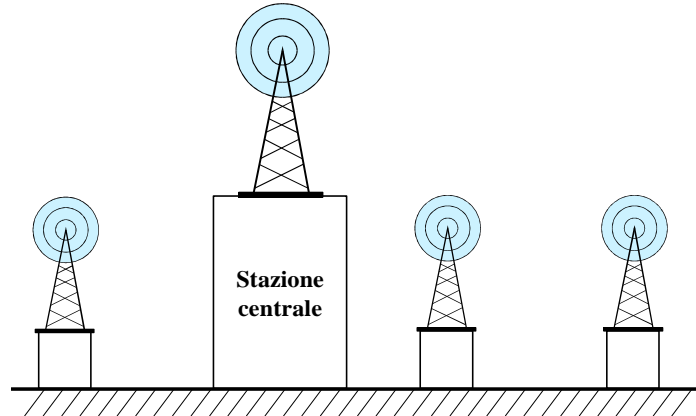
Proprio la semplicità del protocollo ALOHA ne costituisce il grande pregio: quando il carico trasmissivo è basso (ad esempio perché sono poche le stazioni, come accadeva proprio quando il protocollo fu ideato, oppure perché le trasmissioni sono sporadiche), le collisioni diventano un evento eccezionale ed il rendimento complessivo è buono anche riguardo ai tempi di trasmissione.

E' ovvio, viceversa, che all'aumentare del traffico le prestazioni peggiorano, in quanto cresce la probabilità di collisione. Le collisioni, per quanto detto, hanno un effetto devastante. Cosa ancora più grave, le collisioni alimentano se stesse: infatti, a causa delle ritrasmissioni, non solo aumentano i tempi di scambio tra le stazioni (in quanto una generica stazione dovrà fare più tentativi prima che i propri dati giungano alla stazione destinataria), ma aumenta anche il carico complessivo di trasmissione, il che a sua volta aumenta la probabilità di collisione. Questo comporta

³ Ricordiamo che in una rete come questa, nella quale cioè ogni messaggio viene comunque ricevuto da tutte le stazioni collegate, ciascun messaggio può essere specificamente indirizzato ad un unico destinatario, a più destinatari (*multicasting*) o a tutte le stazioni presenti (*broadcasting*)

che, superata una certa **soglia di traffico**, si verificano collisioni praticamente ad ogni trasmissione, il che si traduce in un *traffico reale* (inteso come numero di pacchetti che giungono realmente a destinazione) che scende a zero: la rete crolla.

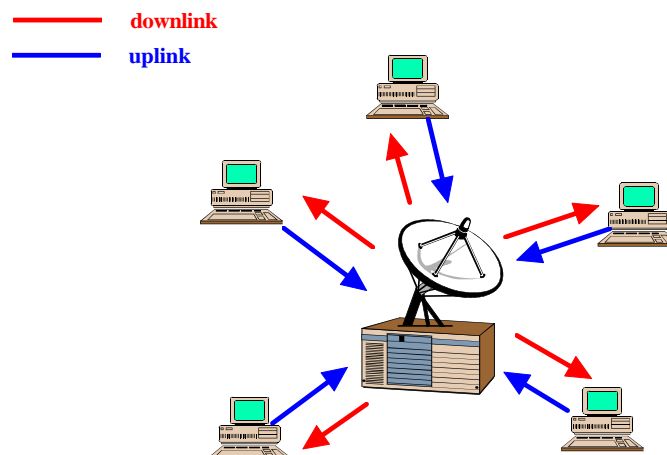
Nei prossimi discorsi vedremo di giustificare con maggiore rigore matematico queste considerazioni. Nel fare questo, però, consideriamo una particolare versione del protocollo ALOHA, nel quale le stazioni fanno tutte riferimento ad una **stazione centrale**:



Le cose non cambiano molto rispetto a prima: infatti, ciascuna stazione continua a trasmettere quando vuole, ma lo fa verso la stazione centrale; questa, a sua volta, trasmette quanto ricevuto a tutte le stazioni. Questo consente di modificare il meccanismo con cui la stazione mittente deve verificare l'esito di una trasmissione: infatti, la stazione centrale, una volta ricevuto un dato messaggio e una volta ritrasmessolo, fa sì che la stazione mittente riceva lo stesso messaggio che ha trasmesso; questo permette alla stazione mittente di capire che la trasmissione è andata a buon fine: infatti, essa confronta il segnale appena ricevuto con quello precedentemente trasmesso (tipicamente fa una correlazione tra i due segnali) e dalla similitudine deduce che anche la o le stazioni destinatarie hanno ricevuto correttamente il messaggio.

E' ovvio che c'è sempre il rischio di una collisione: infatti, se due o più stazioni trasmettono contemporaneamente, i due segnali si sovrappongono (perché sono sulla stessa frequenza) ed arrivano insieme alla stazione centrale; questa non ha alcun modo di separare i messaggi, per cui trasmette esattamente quello che ha ricevuto; a questo punto, le due stazioni mittenti, che si aspettano di ricevere lo stesso messaggio che hanno trasmesso, ricevono invece qualcosa di diverso e deducono che la trasmissione non è andata a buon fine.

Così come abbiamo visto nel caso del satellite, è plausibile ritenere che il canale usato per l'**uplink** (cioè la trasmissione delle stazioni secondarie verso la stazione centrale) sia diverso rispetto al canale per il **downlink** (cioè la trasmissione delle stazioni secondarie verso la stazione centrale):



Questo è utile in quanto una stazione, mentre trasmette, prima ancora di terminare la trasmissione può già cominciare a ricevere, il che permette un controllo dinamico della situazione: infatti, se si è verificata una collisione, ciascuna delle stazioni che stanno trasmettendo si accorge che sta ricevendo qualcosa di diverso da quello che ha trasmesso, per cui può immediatamente interrompere la trasmissione, con conseguente risparmio di potenza. Nel caso precedente, invece, in cui bisognava aspettare la conferma dell'avvenuta ricezione, ogni stazione trasmetteva comunque tutto ciò che voleva trasmettere, salvo poi scoprire che la trasmissione era andata male e che quindi aveva solo sprecato potenza.

Dobbiamo inoltre ricordare che esistono due versioni di protocollo ALOHA, così classificate:

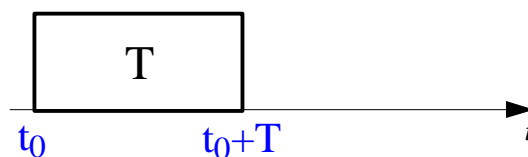
- il protocollo **un-slotted ALOHA** (o anche *ALOHA standard*) è sostanzialmente quello descritto fino ad ora, per cui ogni stazione trasmette appena vuole e per quanto tempo vuole;
- il protocollo **slotted ALOHA** prevede invece che ogni stazione possa trasmettere appena vuole, ma possa farlo solo entro un intervallo temporale ben definito, detto **slot**; in generale, gli slot sono di durata costante e uguale per tutti (ma si può anche pensare di fornire slot più lunghi a quelle stazioni che mediamente generano più pacchetti). E' evidente che, almeno a livello medio, con questo protocollo l'occupazione del canale da parte di una stazione sia minore rispetto a quella del protocollo un-slotted, nel quale non esiste alcuna limitazione temporale.

Ci occupiamo, in questa sede, del protocollo *un-slotted*, visto che abbiamo già avuto modo di parlare della versione *slotted*.

Analisi di efficienza per l' unslotted ALOHA

Cominciamo dunque una analisi più rigorosa del protocollo **unslotted ALOHA**. In particolare, cominciamo a renderci conto del tempo durante il quale si può verificare una collisione.

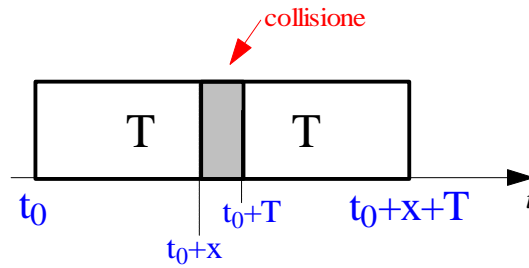
In accordo alla simbologia usata in precedenza, indichiamo con T il tempo di trasmissione di un pacchetto (ossia il tempo che il generico trasmettitore impiega ad immettere il pacchetto sul canale). Se la generica stazione inizia la propria trasmissione all'istante t_0 , la situazione è la seguente:



La trasmissione inizia all'istante t_0 e termina all'istante t_0+T : in tale istante, l'intero pacchetto è stato inviato sul canale.

E' chiaro che non si avrà alcuna collisione sotto due condizioni: quella più banale è quella per cui, quando la stazione comincia a trasmettere, non c'era nessun'altra stazione che lo stava già facendo. Mettiamoci allora in questa ipotesi. La seconda condizione è che nell'intervallo $[t_0, t_0+T]$ nessun'altra stazione cerchi di trasmettere.

Al contrario, supponiamo che una seconda stazione, in un certo istante t_0+x , con $x < T$, cominci ad inviare il proprio pacchetto:



Facciamo delle ipotesi che possano in qualche modo semplificare i nostri ragionamenti:

- in primo luogo, supponiamo che ogni stazione trasmetta i propri pacchetti (ci si riferisce ai pacchetti generati ex-novo, per la prima volta) secondo un processo poissoniano di intensità λ ;
- in secondo luogo, indichiamo con Λ l'intensità del traffico totale generato dalle stazioni, ossia la somma dei pacchetti trasmessi per la prima volta e di quelli che invece, avendo subito collisioni, vengono ritrasmessi. Per semplicità, supponiamo che anche il traffico totale sia di tipo poissoniano (con intensità appunto Λ), anche se questa semplificazione è sicuramente meno lecita di quella precedente.

In parole semplici, *mentre Λ è il traffico totale (medio) inviato sul canale, λ è il traffico dei soli pacchetti nuovi.*

Consideriamo allora un intervallo di tempo di durata T : in base alle caratteristiche del processo di Poisson, sappiamo che la probabilità che ci siano k trasmissioni (cioè k arrivi) nell'intervallo T è data da

$$P(N(T) = k) = \frac{(\Lambda T)^k}{k!} e^{-\Lambda T}$$

Supponiamo che l'intervallo T considerato sia quello necessario ad una data stazione per trasmettere il proprio pacchetto: abbiamo visto che, affinché non ci sia collisione, è necessario che, durante l'intervallo T , non ci sia alcuna trasmissione, ossia $k=0$; la probabilità di tale evento è

$$P(N(T) = 0) = e^{-\Lambda T}$$

Di conseguenza, la probabilità che ci sia una collisione è quella che ci siano 1 o più arrivi durante il tempo T , ossia $1 - P(N(T) = 0) = 1 - e^{-\Lambda T}$.

In realtà, abbiamo detto che c'è un'altra condizione per evitare la collisione: quando la stazione comincia a trasmettere, è necessario che nessun'altra lo stesse già facendo. Di conseguenza, ci si rende conto che l'intervallo totale durante il quale si può verificare una collisione non è T , ma $2T$; di conseguenza, riapplicando la formula di prima, con riferimento però ad un intervallo $2T$, diciamo che la probabilità di collisione è

$$P(N(2T) = 0) = 1 - e^{-2\Lambda T}$$

Abbiamo dunque imposto che, durante l'intervallo $2T$, nel quale assumiamo ci siano due successive trasmissioni effettuate con successo, non ci siano arrivi.

Detto questo, possiamo valutare Λ nel modo seguente:

$$\Lambda = \lambda + \Lambda(1 - e^{-2\Lambda T})$$

La giustificazione di questa formula può essere facilmente compresa. Intanto, dire che λ è l'intensità media del processo di Poisson corrispondente ai nuovi pacchetti trasmessi equivale a dire che λ è il numero medio di pacchetti nuovi trasmessi sul canale nell'unità di tempo. Analogamente, ci si rende conto che $\Lambda(1 - e^{-2\Lambda T})$ rappresenta il numero medio di pacchetti che sono stati ritrasmessi nell'unità di tempo, dato che $(1 - e^{-2\Lambda T})$ è la probabilità di collisione in un intervallo di durata $2T$.

Adesso, essendo T il tempo necessario alla trasmissione di un pacchetto, la quantità ΛT è il numero medio di pacchetti trasmessi nel tempo T :

$$\Lambda T = \lambda T + \Lambda T(1 - e^{-2\Lambda T})$$

La quantità ΛT si indica normalmente con G , per cui scriviamo che

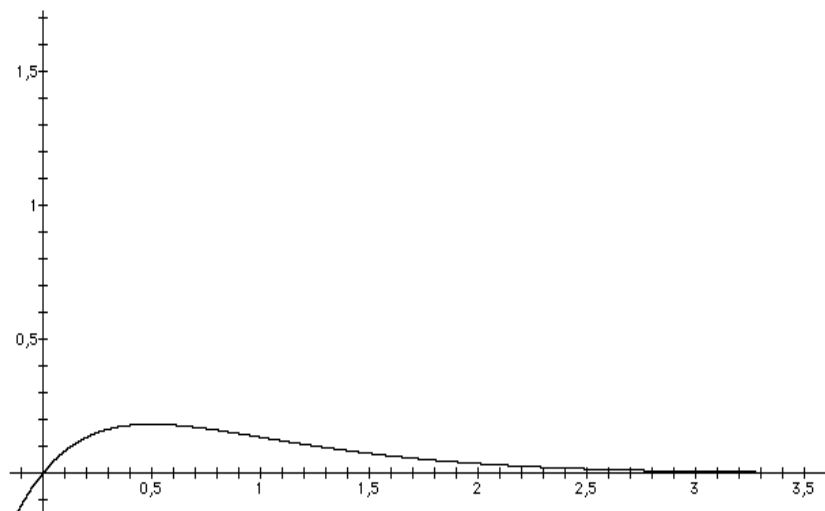
$$G = \lambda T + G(1 - e^{-2G})$$

Per analogia, la quantità $S = \lambda T$ è il numero medio di pacchetti nuovi trasmessi nel tempo T ed è sostanzialmente il parametro di prestazione che più ci interessa (il cosiddetto **throughput**): esplicitandola dall'ultima relazione, otteniamo chiaramente che

$$S = \lambda T = G e^{-2G}$$

Questa è sostanzialmente una misura dell'efficienza del protocollo, in quanto ci quantifica il numero medio di pacchetti nuovi che riusciamo a trasmettere (con successo, cioè senza collisioni e quindi senza necessità di ritrasmettere) sul canale nel tempo T . E' ovvio che si tratta di una quantità minore o uguale ad 1, dato che T è il tempo (deterministico) necessario per l'immissione del singolo pacchetto sul canale. Quanto più S tende ad 1, tanto migliore è l'efficienza del sistema.

Possiamo diagrammare l'andamento di S in funzione di G , ottenendo una curva del tipo seguente:

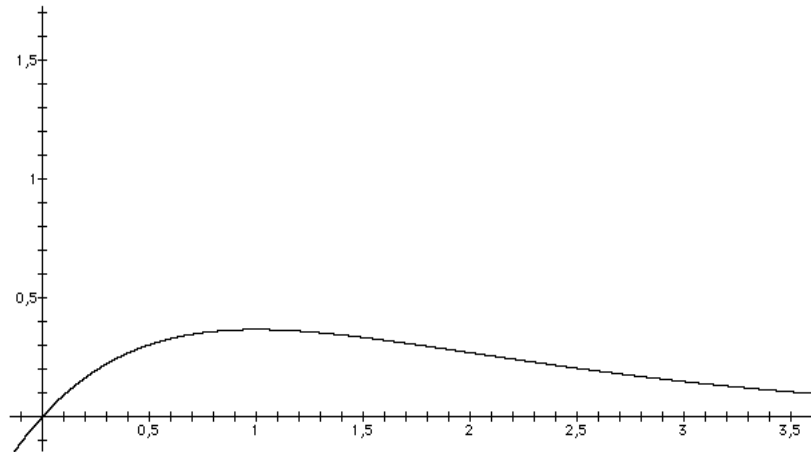


Andamento del throughput S (ordinate) del protocollo unslotted Aloha al variare del traffico in ingresso G (ascisse)

Come si nota, la curva possiede un valore massimo, ottenibile per $G=0.5$, che vale $1/2e$, cioè approssimativamente 0.18. Al di qua e al di là di $G=0.5$, l'efficienza diminuisce.

Questo fatto conforta le considerazioni fatte prima: l'efficienza di questo protocollo (intesa come numero di pacchetti nuovi che riusciamo a trasmettere una sola volta) è massima (e pari a circa il **18%**) solo quando il traffico totale corrisponde a $G=0.5$, ossia $L=0.5/T$; aumentando il traffico totale in ingresso, l'efficienza si riduce progressivamente fino ad annullarsi, cioè fino alla situazione in cui non riusciamo più a trasmettere alcun messaggio (rete in **collasso**).

Possiamo immediatamente fare un confronto con il risultato ottenuto, a suo tempo, con la versione slotted del protocollo ALOHA:



Andamento del throughput (ordinate) del protocollo slotted Aloha al variare del traffico in ingresso

In quel caso, come indicato nel grafico, avevamo trovato che $S = Ge^{-G}$, il che corrisponde ad una efficienza massima, ottenibile in questo caso per $G=1$, del **36%**. Quindi, come era lecito aspettarsi, *il protocollo slotted ALOHA presenta una efficienza doppia rispetto alla versione non slotted*. Il motivo di questa differenza deriva dalle considerazioni fatte prima: mentre nello slotted ALOHA il tempo di collisione coincideva con la durata dello slot temporale⁴, adesso il tempo di collisione è raddoppiato, passando da T a $2T$.

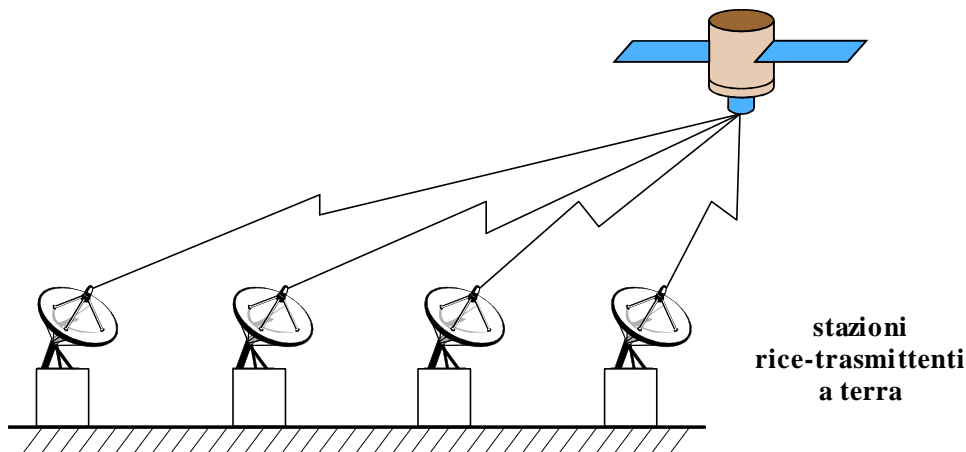
Ulteriori considerazioni sul protocollo

Un pregio importante del protocollo ALOHA, sia nella versione *slotted* sia in quella *un-slotted*, è nel fatto che le sue prestazioni sono del tutto indipendenti dalla distanza delle stazioni secondarie dalla stazione centrale. Infatti, si è visto che il parametro *distanza* non è intervenuto in nessuno dei nostri discorsi. Il motivo è essenzialmente nel fatto che ciascuna stazione si disinteressa completamente di quello che fanno tutte le altre⁵.

⁴ Si supponeva, in quel caso, che la durata dello slot temporale fosse esattamente pari al tempo necessario per la trasmissione di un pacchetto.

⁵ A questo proposito, è bene sottolineare che, mentre le stazioni secondarie non devono necessariamente essere in visibilità radio le une con le altre, ciascuna di esse dovrà essere invece obbligatoriamente in visibilità radio con la stazione centrale. E' fondamentalmente la stessa cosa vista per un sistema in cui la stazione centrale è un satellite.

Questo fatto rende il protocollo ALOHA particolarmente adatto, nonostante i bassi valori dell'efficienza, per **sistemi di comunicazioni via satellite**, nei quali cioè più *stazioni terrestri* comunicano direttamente con un satellite (che sarebbe la *stazione centrale*):



Questo satellite potrà essere un satellite su *orbita geostazionaria*, ossia tale che la distanza Terra-satellite sia costante e pari a 36000 km, oppure un satellite che ruota su altri tipi di orbite, tali che la distanza Terra-satellite risulti variabile⁶. Per analoghi motivi, legati sia all'insensibilità nei confronti della distanza sia alla facilità dell'hardware richiesto alle stazioni secondarie, questo protocollo, in alcune particolari varianti, è stato anche proposto per nuovi sistemi cellulari terrestri.

SCHEMA CSMA/CD

Il protocollo **CSMA** (*Carrier Sense Multiple Access*, che sta per *accesso multiplo a rivelazione di portante*) è una importante evoluzione dello schema *un-slotted ALOHA* ed è perciò un altro protocollo a contesa, nel quale cioè sono possibili le collisioni.

La differenza sostanziale rispetto all'ALOHA è quella per cui una stazione, prima di trasmettere, "ascolta" se v'è già una trasmissione in corso (da cui la terminologia "*rivelazione di portante*") e trasmette solo in caso negativo. Inoltre, durante la trasmissione, la stazione stessa continua a monitorare il canale e si interrompe immediatamente nel caso rilevi una collisione (così come ALOHA).

Si tratta di una tecnica molto diffusa, che presenta una serie di varianti legate soprattutto alla ripresa del tentativo di trasmissione dopo che una stazione ha rilevato che il canale è già occupato.

Una di queste varianti, detta **CSMA/CA** (*Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance*) prevede che la stazione debba attendere un intervallo di tempo, di durata casuale o fissa, prima di ritentare. Grazie all'intervallo di tempo cui sono comunque costrette, le stazioni tendono ad evitare le collisioni, ma questo determina un degrado delle prestazioni.

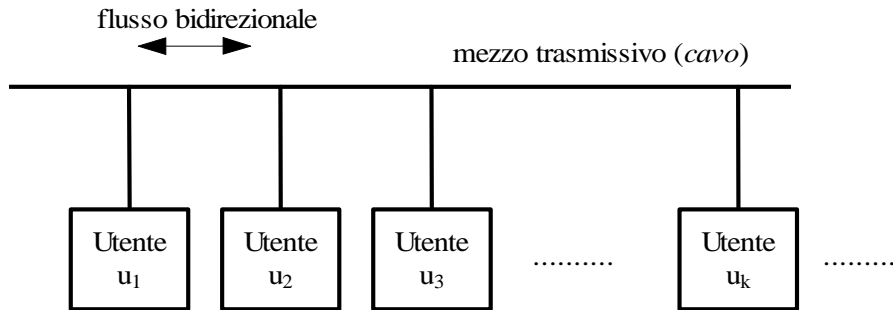
La variante sicuramente più diffusa è quella denominata **CSMA/CD** (*Carrier Sense Multiple Access - Collision Detected*). Essa è stata resa popolare dalle reti locali di tipo **Ethernet** ed è stata standardizzata (col nome di **IEEE 802.3**). Il mezzo trasmissivo usato può essere sia il mezzo radio sia un cavo (mezzo passa-basso): nel primo caso, si usa certamente una portante alla quale agganciare i messaggi⁷, per cui il monitoraggio di una stazione sul canale si basa semplicemente sulla rivelazione della presenza o meno della portante (canale libero

⁶ Si pensi, ad esempio, alle reti telefoniche satellitari, come quelle basate su satelliti **Globalstar** o satelliti **Iridium** (66 satelliti, divisi su 6 orbite polari a distanza di circa 700 km dalla Terra)

⁷ Ci si riferisce chiaramente alle tecniche di modulazione (numerica), in cui una delle caratteristiche della portante (ampiezza, fase, frequenza), viene fatta variare proporzionalmente al segnale modulante, costituito dalla sequenza di bit da trasmettere.

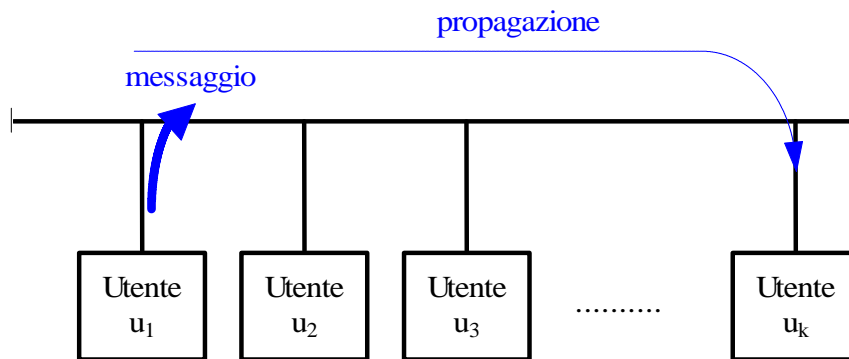
significa assenza di portante); se, invece, si usa un cavo, generalmente non si usa alcuna portante in quanto si trasmette in *banda base*, il che significa che il monitoraggio del canale consiste nel verificare la presenza o meno di segnali qualsiasi (che non siano ovviamente rumore).

Per semplicità, consideriamo il caso di rete cablata, per cui il mezzo trasmissivo è un cavo (ad esempio il **cavo coassiale standard Rg 8** per lo standard **IEEE 802.3**):

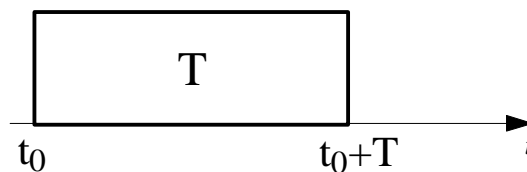


Come detto, ogni stazione monitora continuamente il canale. Quando ha qualcosa da trasmettere, verifica se il canale è libero: appena lo rileva libero, trasmette il proprio messaggio su entrambi i segmenti di cavo (in modo cioè che il messaggio giunga a tutte le stazioni) e continua a monitorare il cavo stesso. Il messaggio raggiunge tutte le stazioni, ma viene conservato solo dal destinatario (o dai destinatari).

Un meccanismo di questo tipo non evita il pericolo delle collisioni e ce ne possiamo rendere conto con un esempio molto semplice:

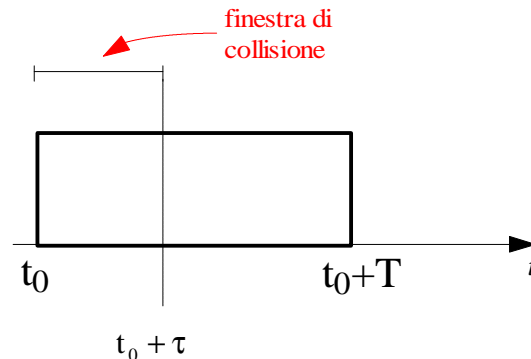


Supponiamo, come indicato in figura, che la prima stazione abbia appena rilevato il canale libero ed abbia così deciso di immettere sulla linea il proprio pacchetto. Essa impiega un tempo T per immettere il pacchetto completo sul canale:



Il segnale elettrico immesso sul cavo impiega a sua volta un certo tempo per propagarsi e raggiungere tutte le stazioni. Questo tempo è evidentemente funzione della distanza tra le stazioni e della velocità di propagazione v_p . La stazione che per ultima riceve il messaggio è quella più lontana dalla stazione mittente. Supponiamo allora che la prima stazione abbia cominciato la propria

trasmissione nell'istante t_0 e che il corrispondente segnale elettrico impieghi un tempo τ per percorrere tutta la linea, fino all'ultima stazione. E' evidente che, nell'intervallo $[t_0, t_0 + \tau]$, il segnale non ha ancora raggiunto l'ultima stazione; di conseguenza, se questa stazione va a monitorare il canale in questo intervallo, lo trova libero, per cui si sente autorizzata a trasmettere, non sapendo che già un'altra stazione aveva cominciato a farlo. Ancora una volta si crea una collisione:



Dato che le stazioni, anche durante la propria trasmissione, continuano a monitorare il canale, esse si accorgono della collisione e cessano di trasmettere.

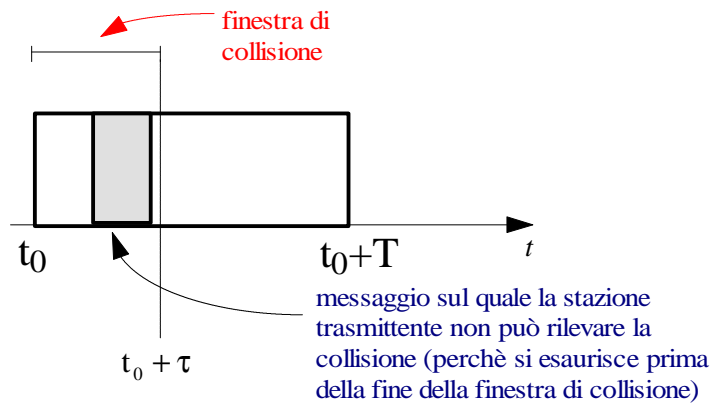
L'intervallo $[t_0, t_0 + \tau]$ prende il nome di **finestra di collisione** e cambia evidentemente al variare della stazione che sta già trasmettendo e della stazione che a sua volta tenta di trasmettere. La massima finestra di collisione è proprio quella che coinvolge le due stazioni estreme della linea. In generale, *la durata della finestra di collisione è direttamente proporzionale alla lunghezza del tratto di cavo considerato ed è inversamente proporzionale alla velocità di propagazione del segnale elettrico sul cavo stesso.*

Anche in questo caso, in seguito ad una collisione, dopo che tale collisione è stata rilevata, ciascuna stazione aspetta un tempo casuale prima di riprovare la trasmissione, in modo da ridurre la probabilità di una collisione successiva.

Come vedremo in dettaglio, *la variante CSMA/CD è quella che permette, tra le tecniche a contesa, le prestazioni migliori.* Se il carico trasmissivo è basso, il tempo di accesso alla trasmissione è inferiore a quello delle LAN del tipo **Token-Ring** (che vedremo più avanti), le collisioni sono poche e quindi le prestazioni effettive brillanti. Inoltre, essendo lo schema molto semplice, anche il corrispondente hardware è abbastanza semplice⁸ e facile da realizzare ed è questo il motivo per cui lo schema CSMA/CD ha riscosso grande successo. Oltre a questo, non essendoci alcuna stazione centrale, si tratta di un sistema completamente distribuito.

E' interessante notare che c'è un preciso vincolo che consenta ad una stazione che ha provocato una collisione di capire che la propria trasmissione non è andata a buon fine. Infatti, consideriamo una stazione che, rilevando libero (erroneamente) il canale, comincia la propria trasmissione. La stazione emette un certo numero di bit, che è proporzionale alla velocità di immissione dei bit in rete. Se il messaggio non è sufficientemente lungo, la sua immissione sul canale potrebbe esaurirsi prima che si concluda la finestra di collisione: in questo caso, la stazione non si accorgerebbe minimamente della collisione.

⁸ La complicazione maggiore è quella per l'hardware dedito al monitoraggio del canale, ma si tratta essenzialmente di misuratori della potenza che circola sul canale stesso.

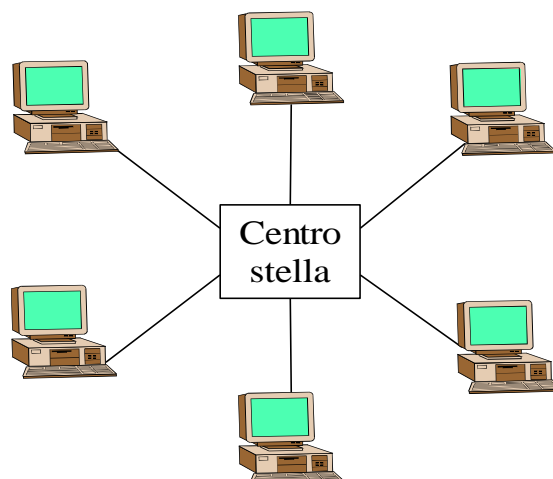


Si possono fare alcuni semplici conti: per una **LAN Ethernet standard**, con un cavo lungo al massimo 2.5 km, una velocità di immissione dei bit in linea di 10 Mbps ed una velocità di propagazione dei segnali elettrici di circa $2 \cdot 10^8$ m/s, si stima che ogni messaggio deve essere lungo almeno **64 byte**. Se esso fosse più corto, come può accadere in alcune applicazioni, bisognerebbe necessariamente inserire dei **byte di riempimento**, privi di contenuto informativo. Questo è un grosso limite di sviluppo: per esempio, se si volesse estendere la rete a lunghezze 10 volte maggiori e contemporaneamente si volesse aumentare dello stesso rapporto la velocità di immissione, la lunghezza minima del messaggio diventerebbe di 6400 byte (cioè $64 \cdot 10 \cdot 10$) e questa è una lunghezza accettabile solo per determinate applicazioni. Anche per questi motivi, quando è stato progettato lo schema di reti locali a 100 Mbps su fibra ottica (**reti FDDI**), è stato seguito uno schema (detto di *token-passing*) diverso dallo schema CSMA/CD. Per gli stessi motivi, le LAN di tipo **Ethernet a 100 Mbps** presentano dimensioni complessivamente ridotte.

Tutti questi discorsi evidenziano comunque una cosa fondamentale: al contrario dello schema ALOHA, lo schema CSMA/CD è fortemente dipendente dalla distanza tra le stazioni. Anzi, abbiamo osservato che tale distanza non può essere troppo elevata, perché questo aumenterebbe la durata della finestra di collisione e quindi, in media, il numero di collisioni. Deduciamo che una rete di telecomunicazioni basata sullo schema CSMA/CD deve necessariamente avere una limitata copertura geografica.

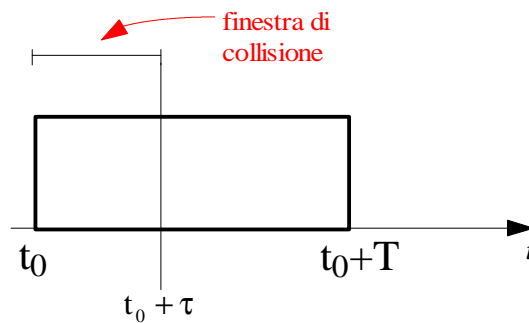
Variante del CSMA/CD con centro stella

Abbiamo osservato prima che la durata τ della finestra di collisione dipende, a parità di velocità di propagazione del segnale elettrico sulla linea, dalla stazione che sta già trasmettendo e da quella che tenta a sua volta di trasmettere. Si può pensare ad una particolare configurazione della rete in cui τ risulti costante per qualsiasi coppia di stazioni:



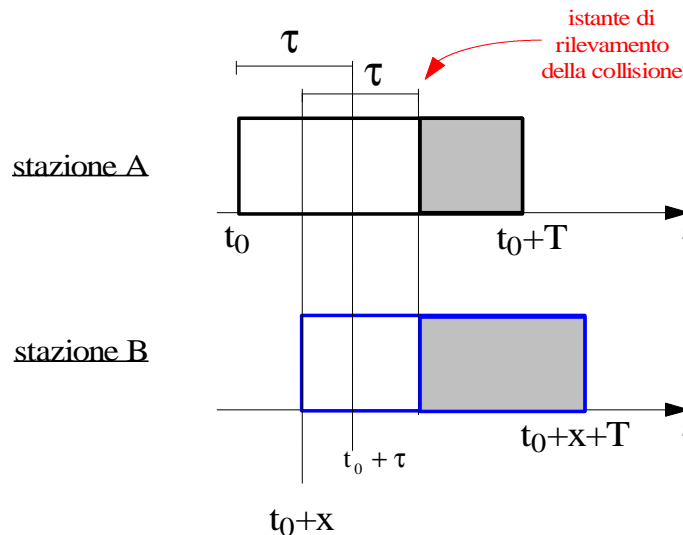
In questa configurazione, si considera dunque un **centro stella**, che ha solo la funzione di smistatore: quando una stazione ha da trasmettere un messaggio, lo invia al centro stella, il quale, in modo del tutto passivo (cioè senza effettuare alcuna operazione sul messaggio stesso), lo ritrasmette a tutte le stazioni, inclusa quella mittente⁹. In questo modo, dall'istante t_0 in cui la stazione ha emesso il proprio pacchetto, il tempo necessario affinché il pacchetto raggiunga le altre stazioni (inclusa quella mittente) è τ per tutte quante, dove $\tau/2$ è il tempo che il pacchetto impiega per andare dalla sorgente al centro stella (*uplink*) ed il successivo $\tau/2$ è il tempo necessario per il percorso dal centro stella alle varie stazioni (*downlink*).

Vediamo adesso di individuare alcuni tempi caratteristici che entrano in gioco all'atto della trasmissione di un pacchetto e nel momento in cui si verifica una collisione. Supponiamo perciò che la generica stazione abbia emesso (in un tempo complessivo T) un pacchetto all'istante t_0 e tale pacchetto impieghi un tempo τ per raggiungere tutte le stazioni:



Come ampiamente osservato prima, τ è dunque la durata della *finestra di collisione*, ossia l'intervallo di tempo durante il quale una qualsiasi altra stazione, andando a testare il canale, lo trova sicuramente libero: se la stazione decide di trasmettere, si verifica la collisione.

Supponiamo che si verifichi proprio questa situazione, ossia che, in un certo istante t_0+x , con $x < T$, un'altra stazione abbia trovato il canale libero ed abbia deciso di approfittarne per inviare un proprio pacchetto:



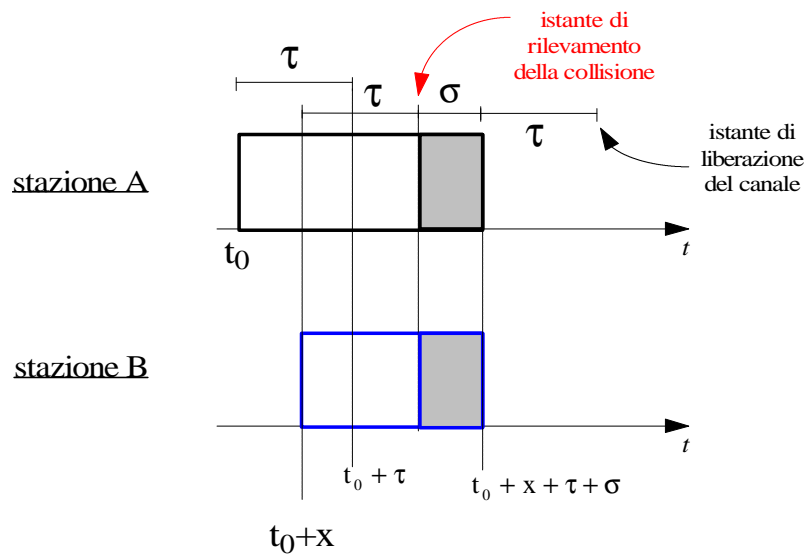
Situazione di collisione tra due stazioni: la stazione A comincia la trasmissione per prima, nell'istante t_0 ; nell'istante t_0+x , cioè prima che si concluda la finestra di collisione (nell'istante t_0+t), la stazione B testa il canale, lo "vede" libero e trasmette a sua volta, determinando la collisione. Tale collisione viene rilevata nell'istante t_0+x+t

⁹ E' esattamente la stessa cosa che succede nel protocollo ALOHA con stazione centrale.

La figura mette in evidenza l'istante in cui viene rilevata la collisione: infatti, la stazione B inizia la propria trasmissione nell'istante t_0+x , per cui il segnale necessita del solito tempo τ per giungere alla stazione centrale e da essa a tutte le stazioni, inclusa B stessa; di conseguenza, la collisione viene rilevata solo nell'istante $t_0+x+\tau$ (e non nel momento stesso in cui B comincia la trasmissione, come si potrebbe erroneamente pensare).

Non è ragionevole pensare che le due stazioni trasmettenti cessino la trasmissione appena rilevata la collisione, ossia esattamente nell'istante $t_0+x+\tau$. E' invece più ragionevole pensare che passi un certo tempo σ (che possiamo supporre costante per tutte le stazioni), prima che ciascuna stazione interrompa la propria trasmissione. Non solo, ma il canale non torna libero appena le stazioni smettono di trasmettere, ma solo dopo un ulteriore tempo τ .

Possiamo perciò completare il diagramma temporale di prima nel modo seguente:



Questo discorso ci porta a concludere che la **durata della collisione**, intesa come l'intervallo di tempo dall'istante in cui la stazione A comincia a trasmettere all'istante in cui il canale risulta nuovamente libero, è

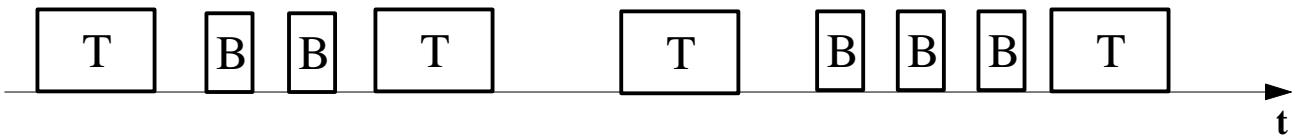
$$B = x + 2\tau + \sigma$$

Questa durata è chiaramente una funzione del tempo x , ossia del tempo che intercorre tra l'inizio della trasmissione della stazione A e l'inizio della trasmissione della stazione B. All'aumentare di x , aumenta anche la durata B . Il valore massimo di x è quello corrispondente a quando la stazione B sfrutta l'ultimo istante libero per iniziare a trasmettere, vale a dire l'ultimo istante della finestra di collisione: questo si ha, in altre parole, quando $x=\tau$, nel qual caso la durata della collisione è

$$B_{\max} = B|_{x=\tau} = 3\tau + \sigma$$

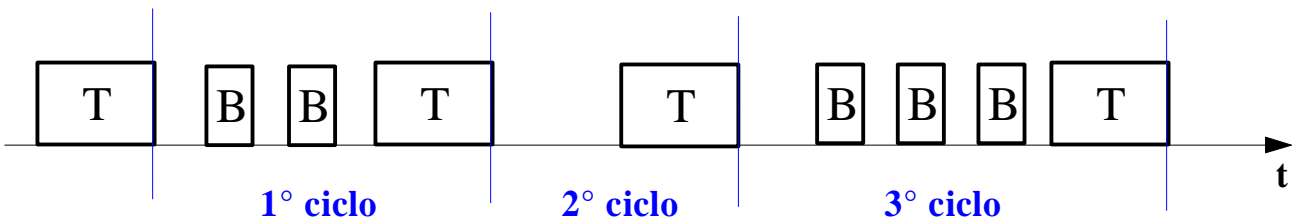
Analisi di efficienza

Così come abbiamo fatto in tutti i casi precedenti, valutiamo l'efficienza dello schema CSMA/CD. A tal fine, risulta utile supporre che ci sia un *osservatore* in grado di osservare l'evolversi temporale del funzionamento della rete, in termini di pacchetti (e relativa durata) trasmessi senza collisioni e pacchetti che hanno subito collisioni (e relativa durata). Per essere più chiari, l'evoluzione di cui parliamo potrebbe essere genericamente quella rappresentata sul seguente asse temporale:



In pratica, il nostro osservatore vede la trasmissione di un primo pacchetto con successo; a questa trasmissione ne seguono due, che però sono state interrotte a causa di una collisione. Seguono altre due trasmissioni, entrambe conclusesi con successo. Poi 3 collisioni ed infine una trasmissione conclusa con successo. E' nient'altro che una possibile realizzazione (ce ne sono infinite) del processo stocastico rappresentativo del funzionamento della rete in esame.

Per condurre i nostri calcoli di efficienza, possiamo pensare di suddividere una realizzazione, come quella appena ipotizzata, in particolari intervalli di tempo, detti *cicli*: un **ciclo** è l'intervallo di tempo che intercorre tra la fine di una trasmissione con successo e la fine della trasmissione con successo immediatamente successiva. Per essere più chiari, nel caso della realizzazione di prima, la suddivisione in cicli è la seguente:



Escludendo ovviamente il primo pacchetto raffigurato (dato che non conosciamo quello che è successo prima), abbiamo individuato 3 cicli: il primo composto da 2 collisioni, il secondo senza collisioni ed il terzo con 3 collisioni. E' ovvio che, in base alla definizione, ogni ciclo contiene una ed una sola trasmissione conclusa con successo.

Questa suddivisione è utile in quanto è ragionevole supporre che ciascun ciclo risulti indipendente dagli altri; il motivo è triplice:

- in primo luogo, l'istante in cui una sorgente inizia a trasmettere risulta indipendente dall'istante in cui una o più altre sorgenti tentano a loro volta di trasmettere¹⁰;
- in secondo luogo, stiamo anche supponendo che il traffico che tutti gli utenti cercano di inviare sulla rete sia un processo di Poisson¹¹ con intensità γ : il processo di Poisson è notoriamente senza memoria, per cui la sua evoluzione, a partire da un dato istante di osservazione, dipende solo dallo stato in quell'istante e non da tutto quello che è successo in precedenza;
- infine, abbiamo ipotizzato sin dall'inizio che una stazione, dopo che si è verificata una collisione, deve aspettare un tempo casuale prima di ritentare la trasmissione.

¹⁰ Diciamo "tentano" in quanto sappiamo che, prima di trasmettere, le stazioni devono verificare che il canale sia libero.

¹¹ Facciamo notare che questa ipotesi, per quanto utile al fine di semplificare i calcoli, non sempre è ragionevole e, anzi, spesso è molto lontana dalla realtà: tipicamente, i casi in cui l'ipotesi di processo di Poisson non è applicabile è quella in cui la trasmissione riguarda segnali video e/o audio, dove si vuole una comunicazione in tempo reale.

Se i cicli sono indipendenti tra di loro, possiamo calcolare l'efficienza con riferimento al generico ciclo: ricordando la definizione generale di efficienza e avendo osservato che ciascun ciclo contiene una ed una sola trasmissione con successo (di durata T), possiamo scrivere che

$$E = \frac{E[T_{\text{utile}}]}{E[T_{\text{totale}}]} = \frac{T}{E[T_{\text{totale}}]}$$

Il denominatore di questa frazione deve necessariamente essere un valore medio, il quanto la durata T_{totale} di un ciclo dipende dal numero di collisioni che si sono verificate ed è perciò una variabile aleatoria.

Per quanto riguarda, invece, il numeratore, la definizione più rigorosa dell'efficienza fa riferimento al *tempo medio utile*, in quanto non è detto che i pacchetti abbiano tutti la stessa lunghezza, per cui il tempo necessario a trasmetterli potrebbe a sua volta essere una variabile aleatoria. Abbiamo allora usato il valore T, assumendo che si tratti di un valore deterministico (noto) se i pacchetti sono a lunghezza fissa oppure che si tratti di un valore medio (non noto) se i pacchetti sono di lunghezza variabile.

Dobbiamo evidentemente esplicitare il denominatore, ossia la durata media di un ciclo. All'interno di un ciclo, avremo sempre 1 pacchetto trasmesso con successo (durata T deterministica) ed un numero imprecisato N di collisioni (di durata B casuale); a questi due tempi, si aggiungono i tempi tra una trasmissione e l'altra, che indichiamo con I (di durata casuale ed incognita) e che sono sempre in numero N+1; possiamo anche aggiungere, come ulteriore tempo, il ritardo di propagazione τ , considerando che, una volta terminata la trasmissione di un pacchetto (con successo), è sempre necessario un tempo τ prima che il canale risulti nuovamente libero: quindi

$$E = \frac{T}{E[T_{\text{totale}}]} = \frac{T}{E[T + N \cdot B + (N + 1) \cdot I + \tau]} = \frac{T}{T + E[N \cdot B] + E[(N + 1) \cdot I] + \tau}$$

Il numero N di collisioni non ha niente a che fare (è indipendente) sia con la durata delle collisioni sia con gli intervalli I tra una trasmissione e l'altra, per cui le medie dei prodotti possono essere calcolate come prodotti delle medie:

$$E = \frac{T}{T + E[N]E[B] + E[N + 1]E[I] + \tau}$$

I parametri da calcolare sono dunque $E[N]$ (numero medio di collisioni in un ciclo), $E[B]$ (durata media di una collisione), $E[I]$ (durata media degli intervalli tra una trasmissione e l'altra).

Cominciamo da $E[I]$. Sostanzialmente, dobbiamo capire che tipo di variabile aleatoria sia I, in modo da conoscerne la distribuzione e quindi da poterne ricavare la media.

Avendo supposto che la generazione dei pacchetti da parte delle stazioni costituisca, complessivamente, un processo di Poisson, appare evidente che I sia il *tempo di interarrivo*. Sappiamo allora che questo tempo di interarrivo ha una distribuzione esponenziale con media $1/\gamma$, dove γ è l'intensità del processo di Poisson.

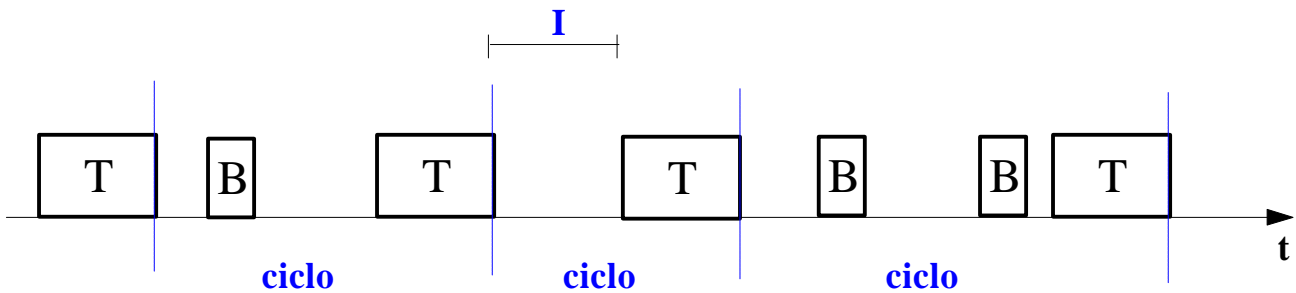
Tornando dunque all'espressione dell'efficienza, possiamo scrivere che

$$E = \frac{T}{T + E[N]E[B] + E[N + 1]\frac{1}{\gamma} + \tau}$$

Passiamo adesso alla variabile aleatoria N , ossia al numero medio di collisioni in un ciclo. Essendo una variabile aleatoria discreta, il nostro obiettivo è quello di applicare la normale definizione, ossia

$$E[N] = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot P(N = k)$$

Dobbiamo dunque calcolare la generica $P(N=k)$, ossia la probabilità che ci siano k collisioni in un ciclo. Partiamo da $k=0$: dire che non ci sono collisioni in un ciclo significa dire che questo ciclo è semplicemente composto da un pacchetto trasmesso con successo e da un generico tempo I trascorso dall'ultima trasmissione completata con successo. E' il caso del ciclo intermedio rappresentato nella figura seguente:



Non solo, ma perché non ci siano collisioni è necessario che, dopo che la trasmissione dell'unico pacchetto è cominciata, non ci siano richieste di trasmissioni entro un tempo τ (durata della finestra della collisione). Quindi, riepilogando, la probabilità che non ci siano collisioni in un ciclo equivale alla probabilità che in un tempo τ non ci sia alcuna richiesta di trasmissione, per cui

$$P(N = 0) = e^{-\gamma\tau}$$

Passiamo a $k=1$: l'evento $k=1$ corrisponde ad un ciclo in cui ci siano una trasmissione conclusa con successo ed una collisione; in particolare, l'ordine prevede prima la collisione e poi la trasmissione con successo, come accade, con riferimento all'ultima figura, al primo ciclo riportato. Dato che i due eventi (collisione e successiva trasmissione con successo) sono indipendenti, possiamo moltiplicare le due probabilità, ossia

$$P(N = 1) = P\left(\begin{array}{l} \text{prima trasmissione} \\ \text{con collisione} \end{array}\right) \cdot P\left(\begin{array}{l} \text{seconda trasmissione} \\ \text{senza collisione} \end{array}\right)$$

La seconda di tali probabilità è ancora una volta $e^{-\gamma\tau}$, mentre la prima sarà il suo complemento ad 1, ossia $1 - e^{-\gamma\tau}$; quindi

$$P(N = 1) = (1 - e^{-\gamma\tau}) \cdot e^{-\gamma\tau}$$

Passiamo a $k=2$: l'evento $k=2$ corrisponde ad un ciclo in cui ci siano una trasmissione conclusa con successo e due collisioni; in particolare, l'ordine prevede prima le 2 collisioni e poi la trasmissione con successo (nell'ultima figura riportata, questo è il caso dell'ultimo ciclo individuato); ancora una volta, dato che i tre eventi sono indipendenti, possiamo moltiplicare le probabilità, ossia

$$P(N=2) = P\left(\begin{array}{c} \text{prima trasmissione} \\ \text{con collisione} \end{array}\right) \cdot P\left(\begin{array}{c} \text{seconda trasmissione} \\ \text{con collisione} \end{array}\right) \cdot P\left(\begin{array}{c} \text{terza trasmissione} \\ \text{senza collisione} \end{array}\right) = (1 - e^{-\gamma\tau}) \cdot (1 - e^{-\gamma\tau}) \cdot e^{-\gamma\tau} = (1 - e^{-\gamma\tau})^2 \cdot e^{-\gamma\tau}$$

A questo punto si intuisce quale possa essere la formula generale:

$$P(N=k) = (1 - e^{-\gamma\tau})^k \cdot e^{-\gamma\tau}$$

Sostituendo allora nell'espressione di $E[N]$, otteniamo

$$E[N] = \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot (1 - e^{-\gamma\tau})^k \cdot e^{-\gamma\tau} = e^{-\gamma\tau} \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot (1 - e^{-\gamma\tau})^k = \dots = e^{\gamma\tau} - 1$$

E' ovvio che la quantità $E[N]$ coincide con $E[N+1]$, per cui

$$E = \frac{T}{T + (e^{\gamma\tau} - 1) \cdot E[B] + (e^{\gamma\tau} - 1) \frac{1}{\gamma} + \tau}$$

Resta da calcolare $E[B]$, ossia la durata media di una collisione. Ricordando allora che, in generale, risulta $B = x + 2\tau + \sigma$, possiamo scrivere che

$$E[B] = E[x + 2\tau + \sigma] = E[x] + 2\tau + \sigma$$

dove abbiamo tenuto conto del fatto che l'unica quantità casuale, non deterministica, è x . Dobbiamo perciò concentrarci su questa variabile aleatoria, tenendo conto che, per come è stata definita, si tratta di una variabile aleatoria a valori continui compresi tra 0 e τ .

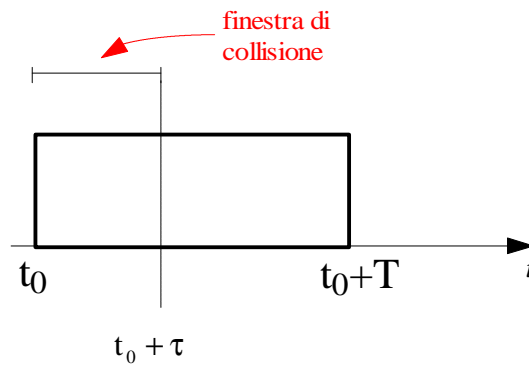
In effetti, sarebbe possibile fare una analisi solo approssimata, attribuendo ad esempio ad x il suo valore massimo τ oppure anche un valore intermedio $\tau/2$. Al contrario, noi scegliamo di condurre una analisi più rigorosa.

Per calcolare la media di una variabile continua, una delle strade possibili consiste nel calcolare la distribuzione cumulativa $F_X(x)$ della variabile stessa, da cui risalire (per derivazione) alla densità di probabilità $f_X(x)$ e quindi alla media.

Per quanto riguarda la distribuzione, sappiamo che la definizione generale è la seguente:

$$F_X(x) = P(X < x)$$

In realtà, nel nostro caso dobbiamo perfezionare questa definizione, in base al fatto che stiamo facendo una ipotesi di fondo: stiamo supponendo che, una volta avviata la trasmissione di un pacchetto da una certa sorgente, ci sia una ulteriore trasmissione che viene avviata durante le finestra di collisione, ossia nell'intervallo $[t_0, t_0 + \tau]$.



Data la stazionarietà, non hanno importanza gli estremi dell'intervallo, ma solo la sua durata τ . Quindi, la definizione della distribuzione della variabile aleatoria X (che quantifica la distanza temporale, dal generico t_0 , alla quale comincia una nuova trasmissione) è

$$F_X(x) = P\left(X < x \mid \begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } \tau \end{array}\right)$$

Questa ipotesi di partenza è necessaria perché si abbia un collisione.

Applicando adesso una nota proprietà delle probabilità condizionate, possiamo scrivere che

$$F_X(x) = \frac{P\left(X < x \cap \begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } \tau \end{array}\right)}{P\left(\begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } \tau \end{array}\right)} = \frac{P\left(X < x \cap \begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } \tau \end{array}\right)}{1 - e^{-\gamma\tau}}$$

dove la sostituzione della quantità $1 - e^{-\gamma\tau}$ a denominatore deriva dalle stesse considerazioni fatte in precedenza, in quanto $e^{-\gamma\tau}$ è la probabilità che non ci siano arrivi nell'intervallo di durata τ .

Consideriamo adesso l'evento dato dalla congiunzione dell'evento $X < x$ e dell'evento per cui c'è almeno un arrivo (cioè una trasmissione) nell'intervallo $[0, \tau]$: dato che $0 < x < \tau$, la congiunzione di tali due eventi significa che, nell'intervallo $[0, \tau]$, c'è almeno un arrivo in $[0, x]$ mentre non ci sono arrivi in $[x, \tau]$:

$$F_X(x) = \frac{P\left(\begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } [0, x] \end{array} \cap \begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } [x, \tau] \end{array}\right)}{1 - e^{-\gamma\tau}}$$

Questi due eventi hanno il pregio di essere indipendenti, per cui possiamo calcolare la probabilità congiunta come prodotto delle probabilità:

$$F_X(x) = \frac{P\left(\begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } [0, x] \end{array}\right) \cdot P\left(\begin{array}{l} \text{almeno un arrivo} \\ \text{nell'intervallo } [x, \tau] \end{array}\right)}{1 - e^{-\gamma\tau}}$$

Sfruttando adesso nuovamente gli stessi discorsi fatti per il calcolo di $E[N]$, possiamo esplicitare facilmente le due probabilità:

$$F_X(x) = \frac{(1 - e^{-\gamma x}) \cdot e^{-\gamma(\tau-x)}}{1 - e^{-\gamma\tau}} = \frac{e^{-\gamma(\tau-x)} - e^{-\gamma\tau}}{1 - e^{-\gamma\tau}} = \frac{(e^{\gamma x} - 1)e^{-\gamma\tau}}{1 - e^{-\gamma\tau}} = \frac{e^{\gamma x} - 1}{e^{\gamma\tau} - 1}$$

Adesso, per derivazione rispetto ad x possiamo ricavare la densità di probabilità di X:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} = \frac{1}{e^{\gamma\tau} - 1} \frac{d}{dx} (e^{\gamma x} - 1) = \frac{\gamma e^{\gamma x}}{e^{\gamma\tau} - 1}$$

Infine, applicando la definizione di media per una variabile aleatoria continua, abbiamo quanto segue:

$$E[X] = \int_0^{\tau} x f_X(x) dx = \int_0^{\tau} x \frac{\gamma e^{\gamma x}}{e^{\gamma\tau} - 1} dx = \frac{\gamma}{e^{\gamma\tau} - 1} \int_0^{\tau} x e^{\gamma x} dx$$

L'integrale ottenuto può essere risolto per parti:

$$\int_0^{\tau} x e^{\gamma x} dx = \frac{1}{\gamma} \int_0^{\tau} x (\gamma e^{\gamma x}) dx = \frac{1}{\gamma} \left[x e^{\gamma x} \Big|_0^{\tau} - \int_0^{\tau} e^{\gamma x} dx \right] = \frac{1}{\gamma} \tau e^{\gamma\tau} - \frac{1}{\gamma^2} (e^{\gamma\tau} - 1) = \frac{1}{\gamma} \left(\left(\tau - \frac{1}{\gamma} \right) e^{\gamma\tau} + \frac{1}{\gamma} \right)$$

Sostituendo in E[X], abbiamo dunque che

$$E[X] = \frac{\left(\tau - \frac{1}{\gamma} \right) e^{\gamma\tau} + \frac{1}{\gamma}}{e^{\gamma\tau} - 1} = \frac{1}{\gamma} \frac{(\gamma\tau - 1)e^{\gamma\tau} + 1}{e^{\gamma\tau} - 1} = \frac{1}{\gamma} \frac{\gamma\tau - 1 + e^{-\gamma\tau}}{1 - e^{-\gamma\tau}}$$

Possiamo dunque sostituire quanto ottenuto nell'espressione di E[B]:

$$E[B] = E[X] + 2\tau + \sigma = \frac{1}{\gamma} \frac{\gamma\tau - 1 + e^{-\gamma\tau}}{1 - e^{-\gamma\tau}} + 2\tau + \sigma$$

Infine, dobbiamo sostituire questa espressione in quella dell'efficienza:

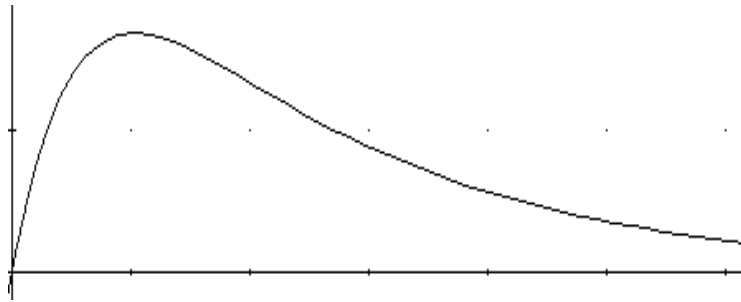
$$E = \frac{T}{T + (e^{\gamma\tau} - 1) \cdot \left[\frac{1}{\gamma} \frac{\gamma\tau - 1 + e^{-\gamma\tau}}{1 - e^{-\gamma\tau}} + 2\tau + \sigma \right] + (e^{\gamma\tau} - 1) \frac{1}{\gamma} + \tau}$$

Dobbiamo adesso fare qualche manipolazione algebrica al fine di trovare una espressione più compatta. Al termine dei passaggi, si trova quanto segue:

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{\left(3a + \frac{\sigma}{T} \right) G + \left[1 + G \left(1 - a - \frac{\sigma}{T} \right) \right] e^{-aG}}$$

Abbiamo qui riportato direttamente il parametro S, rappresentativo del numero medio di pacchetti che riusciamo a trasmettere nel tempo T. Ovviamente, S è compreso tra 0 ed 1, visto che il tempo medio di trasmissione di un pacchetto è proprio T.

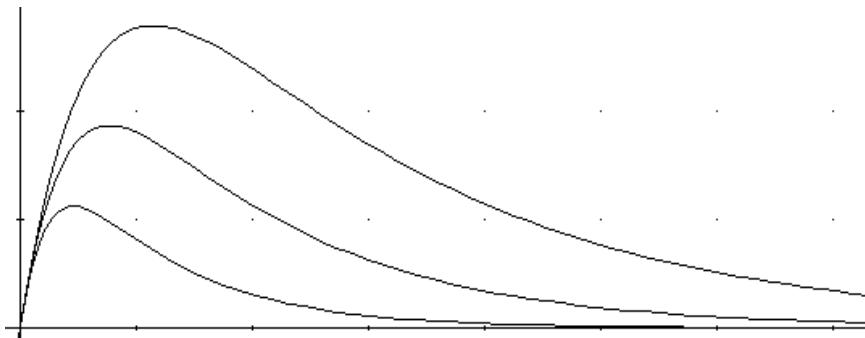
Se diagrammiamo S in funzione di G, otteniamo quanto segue:



Ciò che si nota subito è che anche questo sistema risulta instabile, nel senso che all'aumentare di G l'efficienza crolla. Il motivo è semplice: se aumenta il numero di pacchetti che le stazioni vogliono trasmettere, le collisioni aumentano, per cui aumentano le ritrasmissioni e quindi il numero di pacchetti che vengono trasmessi con successo cala rapidamente a zero.

E' presente altresì un massimo dell'efficienza, ottenibile per un particolare valore G_{max} di G: *per mantenere le migliori prestazioni, bisogna fare in modo che il traffico in ingresso sia sempre prossimo al valore G_{max} e che, comunque, non lo superi, perché questo, data la suddetta instabilità, potrebbe portare la rete al collasso.*

Un'altra cosa interessante si ricava diagrammando S non solo in funzione in G, ma anche al variare del parametro $a=\tau/T$:



Ciò che si nota, da un simile diagramma, è che l'efficienza cresce al diminuire di a. Per diminuire a, ci sono ovviamente due possibilità: ridurre il parametro τ , il che significa sostanzialmente ridurre la copertura geografica della rete, oppure aumentare T, ossia utilizzare trasmettitori più veloci.

Concludiamo osservando che, dati i numerosi pregi dello schema CSMA/CD, ne sono state studiate una serie di varianti, allo scopo essenzialmente di stabilizzarlo, ossia di garantire che un aumento eccessivo del traffico in ingresso al canale non determini comunque il collasso della rete. Pur senza scendere in dettagli, appare comunque ovvio che il metodo base per la stabilizzazione consiste in una oculata gestione delle collisioni. Nei discorsi che noi abbiamo fatto, invece, la gestione delle collisioni è stata posta nella maniera più semplice possibile (dopo una collisione, la stazione blocca la trasmissione ed attende un tempo casuale prima di ritentare).

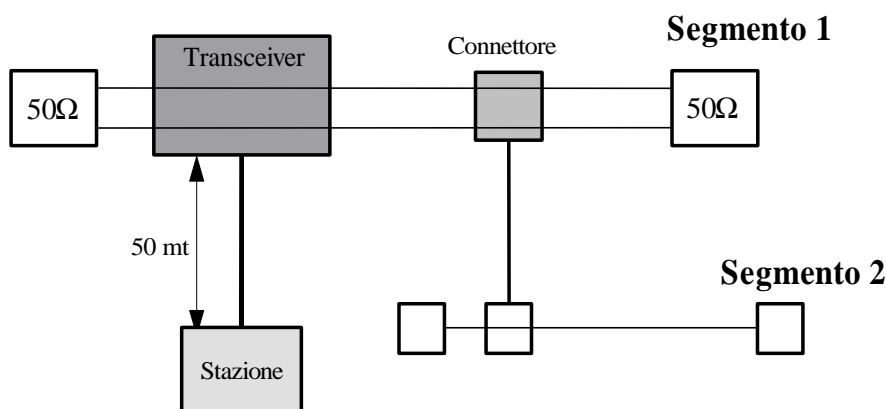
Reti locali di tipo Ethernet

Come anticipato all'inizio, lo schema CSMA/CD è stato implementato sulle reti locali di tipo **Ethernet**.

Le reti locali di tipo **Ethernet** corrispondono allo **standard IEEE 802.3** oppure ad una delle sue numerose varianti (come vedremo dopo).

La rete Ethernet vera e propria fu definita ed installata da *DEC* e *Xerox* (che l'hanno progettata insieme alla *Intel*). Lo standard 802.3 è una evoluzione, per cui differisce leggermente dallo standard originale. Questo prevede i seguenti punti cardine:

- tecnica d'accesso **CSMA/CD**;
- topologia a **dorsale**;
- cavo coassiale standard **RG-8** (cavo giallo);
- trasmissione in **banda base**;
- velocità di trasmissione di **10 Mbps**;
- un massimo di **5 segmenti** di cavo, lunghi ciascuno al massimo **500 metri** e connessi per mezzo di **ripetitori**;
- un massimo di **100 stazioni** per segmento;
- un collegamento tale che la trasmissione non attraversi più di 2 ripetitori consecutivi, il che si traduce banalmente nel dire che i segmenti in cascata non possono essere più di 3.



Componenti di una LAN Ethernet standard

I ripetitori sono necessari per la connessione tra più segmenti per un motivo molto semplice: il segnale, nel propagarsi lungo il generico segmento, subisce una inevitabile attenuazione, considerando anche il fatto che ciascuna stazione, sempre secondo lo standard, spilla una certa quantità di potenza dal canale, in modo da ricevere un segnale di qualità accettabile. Questa stessa qualità deve essere conservata per ciascuna stazione su ogni segmento, il che impone di compensare le perdite di potenza via via incontrate dal segnale¹².

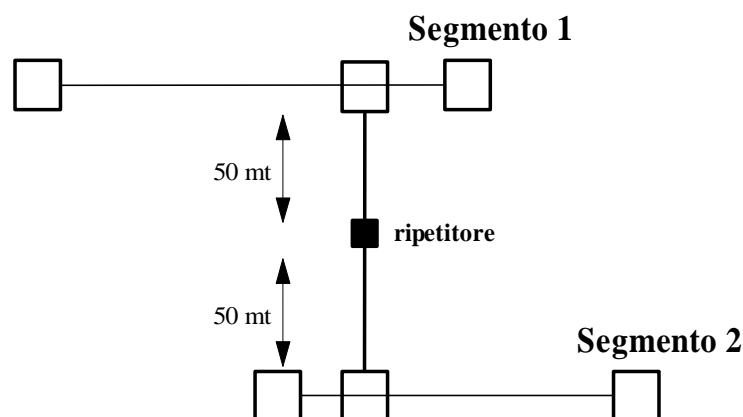
¹² Il discorso dei ripetitori e della qualità del segnale non è valido solo in questo caso, ma in generale, per qualunque rete: il segnale elettrico subisce infatti sempre una attenuazione, la quale va prevista e calcolata, in sede di progetto, in modo che ciascuna stazione riceva un segnale sempre di qualità accettabile. Tanto per fare una analogia, pensiamo a quello che accade quando si trasmette un segnale analogico con una tecnica di modulazione di frequenza (FM): sappiamo bene che il demodulatore FM è un apparecchio che, per funzionare, ha bisogno di ricevere in ingresso un segnale cui corrisponda un rapporto segnale/rumore non inferiore ad una determinata *soglia*. Se il rapporto S/N supera la soglia, il demodulatore funziona e lo fa tanto meglio quanto

Per ogni stazione, i componenti tipici di Ethernet nella versione originaria sono i seguenti:

- adattatore sulla stazione;
- cavo di interconnessione;
- un transceiver per rice-trasmettere sul cavo coassiale;
- un meccanismo di collegamento.

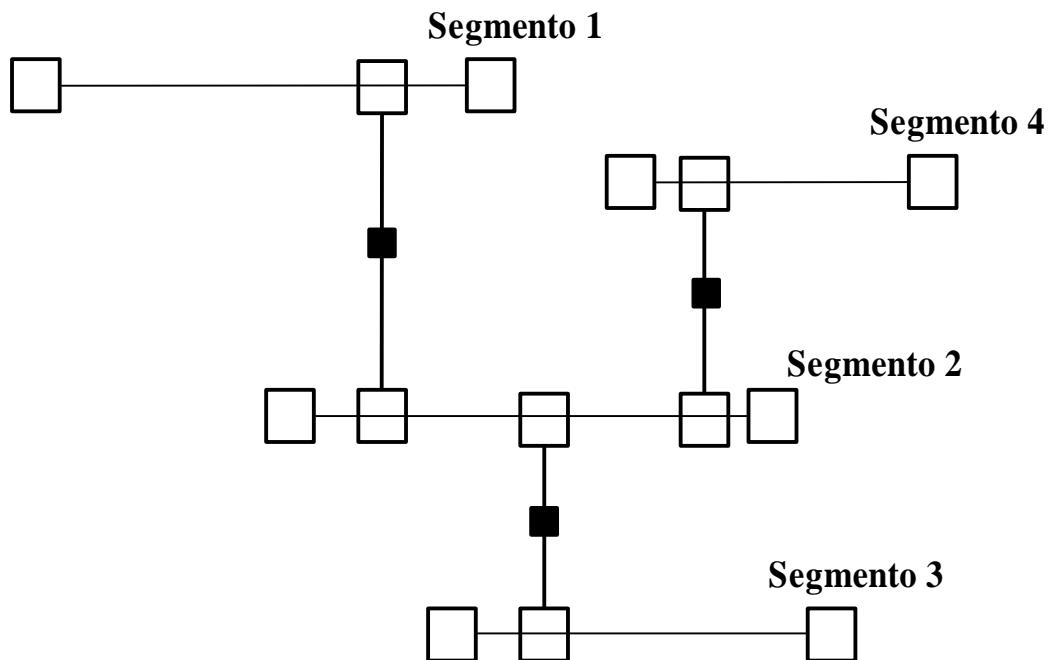
Su questi componenti sono inoltre fissate particolari specifiche tecniche, tra le quali citiamo le seguenti:

- per quanto riguarda il cavo coassiale, si tratta del cavo **RG-8**, avente impedenza caratteristica di **50 Ω** ;
- ogni segmento, lungo al massimo **500 metri**, è dotato di un **terminatore di impedenza** (sempre da 50 Ω) ad ogni suo estremo, in modo da evitare indesiderati fenomeni di riflessione del segnale;
- più segmenti possono essere tra loro collegati mediante dei **ripetitori**: questi non sono delle stazioni attive (che cioè elaborano in qualche modo il segnale), ma dei semplici *rigeneratori di segnale*, che cioè ricevono il segnale da un segmento, lo rigenerano e infine lo trasmettono su un altro segmento;
- le stazioni d'utente possono essere connesse a qualsiasi punto del cavo, rispettando gli eventuali vincoli determinati dalle caratteristiche elettriche del cavo: ad esempio, ci deve essere una distanza minima di **5 metri** tra due stazioni;
- la connessione fisica al cavo coassiale può essere **a spina** oppure **a T**;
- il collegamento tra il *transceiver* (che è necessario per rice-trasmettere i segnali) sul cavo coassiale e la corrispondente stazione d'utente è costituito da un **cavo di interconnessione** lungo al massimo **50 metri**; su tale cavo sono trasmessi i dati della stazione (in banda base e secondo il **codice Manchester**) ed alcuni segnali di controllo.
- sempre di **50 metri** è la massima lunghezza del cavo che può connettere un dato segmento ad un ripetitore, sia nel caso in cui il segnale venga prelevato dal segmento sia nel caso in cui il segnale venga inviato al segmento:



maggiore è S/N; viceversa, se il rapporto S/N è inferiore alla soglia, non importa di quanto sia inferiore, in quanto comunque il demodulatore non funziona. In modo del tutto analogo, le stazioni di una rete necessitano, in ingresso, di un segnale di qualità non inferiore ad un minimo prefissato.

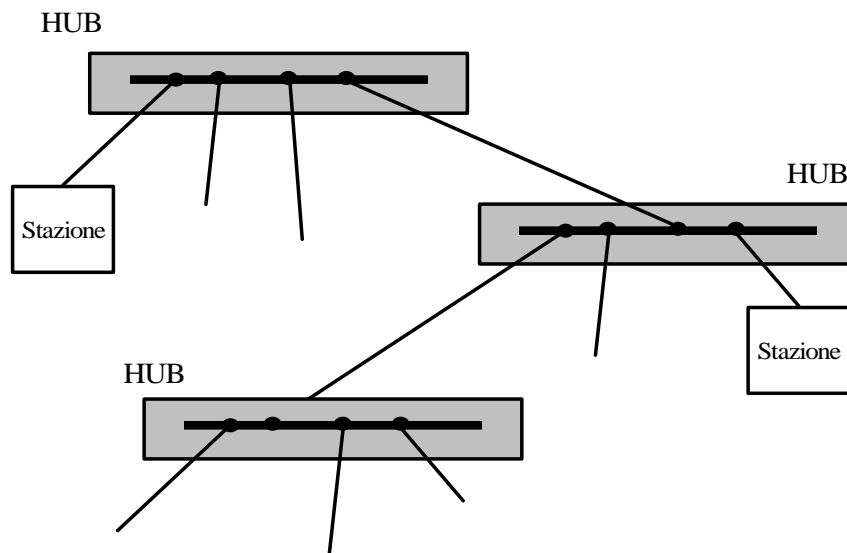
Come già detto, i segmenti in cascata non possono essere più di 3, per cui, ad esempio, nella figura seguente possiamo connettere al segmento 2 altri due segmenti, ma questi ultimi non potranno essere connessi ad ulteriori segmenti:



Ci sono poi una serie di varianti, tra le quali spiccano le seguenti:

- **standard IEEE 802.3A** (o *Cheapernet*): è una rete Ethernet su cavo coassiale sottile (detto volgarmente *coassialino*), con segmenti lunghi al massimo 185 metri e con un massimo di 30 stazioni per segmento; la lunghezza complessiva non deve essere superiore a 925 metri, mentre il resto dei parametri rimane immutato;
- **standard IEEE 802.3B** (o *Starlan*): rete Ethernet su doppino telefonico, sempre con topologia a dorsale, che prevede la trasmissione ad 1 Mbps (anziché a 10 Mbps) e una estensione massima di 500 metri;
- **standard IEEE 10Base36** (o *Starlan*): rete Ethernet su cavo coassiale, ma con trasmissione in banda larga.

A queste varianti se ne aggiunge un'altra, che ormai è quella più presente sul mercato, che va sotto il nome di **standard IEEE 10BaseT** ed è stata definita nel 1990. Le differenze sostanziali con lo standard 802.3 sono essenzialmente nel cavo trasmissivo, che adesso è il **doppino telefonico**, ma soprattutto nella configurazione: infatti, nella variante *10baseT* i segmenti sono stati accorciati fino ad essere inclusi in un unico scatolotto, che prende il nome di **hub** (in italiano *concentratore*). La figura seguente aiuta a capire quale sia la scelta implementata:



Schema di Ethernet 10BaseT

L'*hub* ha sia la funzione di connettere le varie stazioni, sia la funzione di rigenerare i segnali. I cavi di collegamento tra stazioni utente e hub possono arrivare fino ad un massimo di 100 metri.

Gli hub possono formare una gerarchia con un massimo di 4 livelli. Le diramazioni a valle di un hub servono per connettere le stazioni d'utente o gli hub di livello inferiore, secondo una qualsiasi combinazione. Il numero di componenti che un hub può connettere è variabile da circa una decina a più di 100.

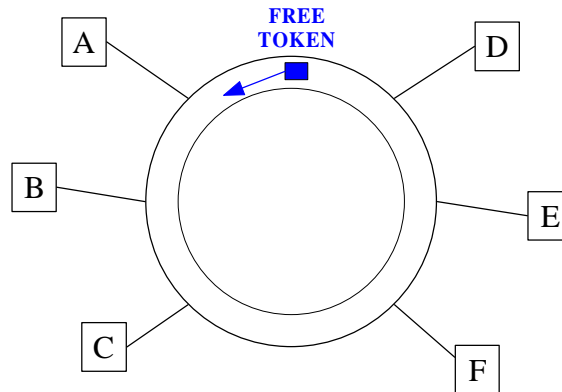
Grazie alla funzione di rigenerazione del segnale degli hub, la velocità di trasmissione è di **10 Mbps** nonostante si usi il doppino telefonico¹³ anziché il cavo coassiale. In comunque con la rete Ethernet classica rimane il fatto che il metodo d'accesso sul segmento di cavo dell'hub è del tipo CSMA/CD.

Da notare inoltre che l'eventuale malfunzionamento di una stazione non danneggia in alcun modo la rete, al contrario di quanto accadeva in assenza degli hub.

¹³ Quasi sempre si usa l'UTP, ossia una coppia di fili intrecciati senza guaina, ma si può usare anche il cavo STP, ossia una coppia di fili intrecciati con guaina

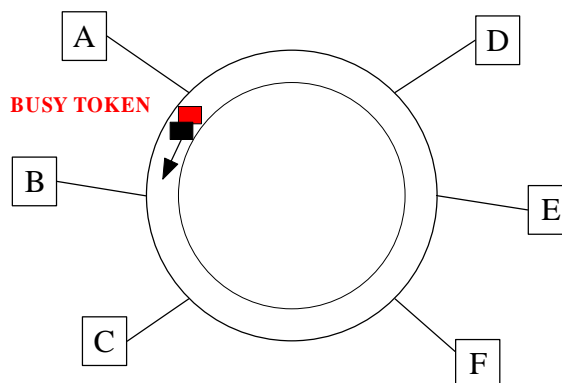
TECNICA DEL PASSAGGIO DEL TOKEN (TOKEN PASSING)

La tecnica detta del **token passing** è una tecnica *non a contesa* (o di *accesso multiplo ordinato*), nella quale cioè non sono possibili collisioni. Essa conviene soprattutto nelle reti con *topologia ad anello (ring)*. Consideriamo allora proprio una rete ad anello, schematizzata come nella figura seguente:

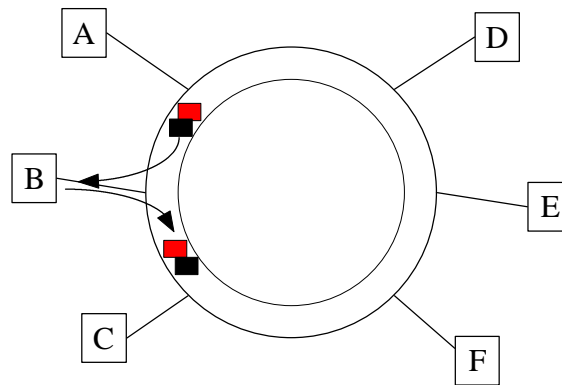


Il principio di base è che una generica stazione, per poter trasmettere (cioè accedere al canale di trasmissione) deve ricevere il cosiddetto **token**, ossia una particolare configurazione di bit che l'autorizzi a trasmettere. In particolare, essa aspetta il cosiddetto **free token**, che, come vedremo, si distingue dal **busy token**. Il token ha generalmente una lunghezza di 16 bit; il *free token* si differenzia dal *busy token* per uno o più bit. Per semplicità, possiamo supporre che il token sia lungo 8 bit e che il *free token* si differenzi dal *busy token* per l'ultimo bit, che vale 0 per il free token ed 1 per il busy token

Ogni stazione riceve a turno, dalla stazione che la precede secondo il senso della trasmissione (che è unidirezionale), il *free token*. Nell'ultima figura, è la stazione A che riceve il free token. Appena riceve questo token, la stazione deduce che può trasmettere. Immette allora sulla rete il proprio pacchetto, accodando ad esso il *busy token*, in modo da segnalare alle altre stazioni che il diritto a trasmettere è stato acquisito:



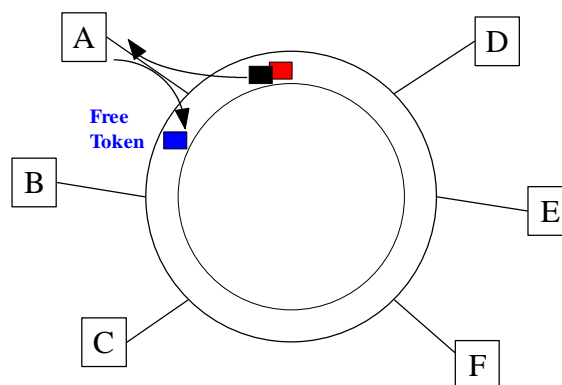
L'insieme dei bit rappresentativo del pacchetto e del busy token si propaga dunque lungo l'anello, attraversando tutte quante le stazioni. Ogni stazione che riceve i bit, si comporta nel modo seguente: man mano che i bit arrivano, li memorizza, li rigenera e li ritrasmette uno ad uno verso la stazione successiva:



Il messaggio (pacchetto + token busy) emesso dalla stazione A viene ricevuto per primo dalla stazione B, la quale lo memorizza, lo rigenera e lo ritrasmette sul canale verso la stazione successiva. Stesso comportamento per tutte le stazioni

Per semplicità, supponiamo per il momento che la stazione non faccia alcuna elaborazione dei bit tra l'istante in cui comincia a riceverli e l'istante in cui finisce di ritrasmetterli¹⁴. Al contrario, una volta che la stazione ha finito di ritrasmettere il pacchetto, ne possiede una copia, sempre insieme al token, nella propria memoria (**buffer**), per cui può farne una elaborazione: tipicamente, la stazione deve andare a leggere l'indirizzo del destinatario del pacchetto e verificare se si tratta del proprio indirizzo (il che significa che il pacchetto è destinato proprio ad essa), oppure no (nel qual caso può tranquillamente scartare il pacchetto)¹⁵.

Con questo meccanismo è evidente che il pacchetto percorre tutto l'anello, attraversando tutte le stazioni, fino a giungere nuovamente alla stazione che lo aveva trasmesso:



A questo punto, la stazione trasmittente si rende conto che il pacchetto è sicuramente passato per tutte le stazioni, inclusa quella o quelle cui era destinato. A seconda delle scelte di progetto, la stazione trasmittente può adesso trasmettere un secondo pacchetto oppure liberare il canale. Supponiamo che sia obbligata a liberare il canale, come indicato nell'ultima figura. Per fare questo, è sufficiente che essa emetta nuovamente un *free token*, il quale raggiungerà così la stazione successiva, conferendole il diritto a trasmettere. Se questa stazione ha da trasmettere un proprio

¹⁴ E' ovvio, comunque, che una minima elaborazione è necessaria: infatti, la stazione che riceve i bit va a leggere il token e si accorge che si tratta di un *busy token*, per cui non tenta di trasmettere a sua volta, limitandosi a rigenerare e ritrasmettere gli stessi bit che ha ricevuto.

¹⁵ E' importante sottolineare una caratteristica di quelle reti che, come in questo caso, prevedono che i bit trasmessi da una stazione risultino a disposizione di tutte le altre stazioni. Le situazioni possibili sono 3: la prima è quella in cui il pacchetto è destinato ad un'unica stazione; la seconda è quella in cui il pacchetto è destinato a più stazioni (si parla in questo caso di pacchetto o messaggio **multicast**); la terza è quella in cui il pacchetto è effettivamente destinato a tutte le stazioni della rete (si parla in questo caso di pacchetto o messaggio **broadcast**).

pacchetto, allora si comporta così come visto prima; se invece non ha niente da trasmettere, emette anch'essa un free token passando il diritto a trasmettere alla stazione ancora successiva.

A queste considerazioni dobbiamo però aggiungerne delle altre. Consideriamo infatti la stazione che si riconosce essere destinataria del pacchetto appena ricevuto. In questo caso, è opportuno che la stazione compia una certa elaborazione sui bit ricevuti:

- in primo luogo, essa imposta su ON un particolare **bit di indirizzo riconosciuto**, in modo da segnalare, alla stazione mittente, che il suo pacchetto è stato effettivamente ricevuto;
- in secondo luogo, essa effettua anche un controllo degli errori: l'esito di questo controllo viene indicato ancora una volta imposta un opportuno **bit di corretta ricezione**, posto generalmente in coda al pacchetto.

In questo modo, quando il pacchetto ritorna alla stazione che lo ha trasmesso, quest'ultima è in grado di sapere sia se il pacchetto è stato ricevuto sia, in caso affermativo, se ci sono stati o meno errori. Essa, quindi, elimina il pacchetto dalla rete, annota se la trasmissione è andata a buon fine oppure no, ma comunque, a prescindere dall'esito della trasmissione e dall'eventuale necessità di trasmettere altri pacchetti, emette un nuovo free token e libera il canale.

La scelta di consentire a ciascuna stazione la possibilità di emettere un solo pacchetto per volta deriva da una considerazione molto semplice: evitare che una stazione monopolizzi il canale di trasmissione.

E' inoltre evidente che, con questo meccanismo, viene evitata del tutto la possibilità di contese, in quanto solo la stazione in possesso del token è autorizzata a trasmettere. Si tratta dunque di un metodo deterministico, che non presenta rischi di collisione o, peggio, di collasso di rete (che si può verificare invece nelle reti con accesso a contesa come quelle basate sul protocollo *ALOHA*), che offre prestazioni elevate e stabili anche in presenza di carico trasmissivo elevato.

Analisi di efficienza

Anche per la tecnica del passaggio del token è possibile condurre una analisi di efficienza, al fine di verificare le prestazioni nei confronti dell'uso del mezzo trasmissivo. Vediamo allora per grandi linee come si può impostare l'analisi.

Per prima cosa, consideriamo una situazione di massimo carico per la rete, nella quale cioè ogni stazione ha da trasmettere un pacchetto¹⁶.

Supponiamo che, nell'istante t_0 , la stazione A, disponendo di un *free token*, emetta un proprio pacchetto (seguito dal *busy token*), impiegando il solito tempo T per immetterlo in linea. Questo pacchetto impiega un certo tempo per raggiungere la stazione B; dopo un minimo tempo di elaborazione, la stazione B ritrasmette sulla linea lo stesso pacchetto e la cosa si ripete fin quando il pacchetto non ritorna alla stazione A. A questo punto, la stazione A deve lasciare libero il canale, per cui emette un nuovo free token, il quale impiega un ulteriore tempo per giungere alla stazione B. Questa lo acquisisce ed inizia la propria trasmissione, secondo lo stesso procedimento di A e tutto ciò si ripete per ciascuna stazione.

Possiamo allora individuare come **ciclo** quello corrispondente all'intervallo di tempo necessario affinché tutte le stazioni effettuino la propria trasmissione. In altre parole, un ciclo è caratterizzato dal fatto che ciascuna stazione dell'anello ha trasmesso il proprio pacchetto. Indichiamo inoltre con τ il tempo necessario affinché un pacchetto, emesso da una data stazione, percorra l'intero anello, fino a tornare alla stazione stessa. Supponiamo infine che le stazioni connesse siano in tutto N .

¹⁶ Ricordiamo che stiamo supponendo che ciascun stazione possa trasmettere non più di 1 pacchetto per volta.

E' possibile ancora una volta immaginare la presenza di un osservatore che osservi il funzionamento della rete: sotto le ipotesi fatte, è evidente che l'osservatore vedrà una serie di cicli tutti indipendenti tra loro, per cui ancora una volta possiamo calcolare l'efficienza con riferimento al generico di questi cicli.

Durante il generico ciclo, abbiamo l'emissione di N pacchetti, tanti quante sono le stazioni. Ogni pacchetto viene immesso sul canale, dalla propria stazione, in un tempo T e percorre l'anello in un tempo τ ; deduciamo, in base a considerazioni analoghe a quelle fatte per i protocolli precedenti, che il tempo complessivo di utilizzo del canale è $NT+N\tau$, mentre la frazione utile di tale tempo è solo NT. Quindi, con riferimento al generico ciclo, possiamo scrivere che l'efficienza è

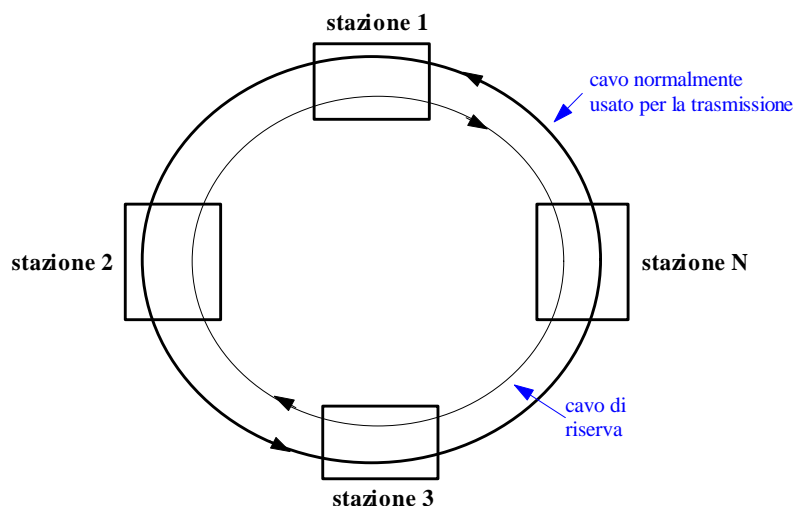
$$E = \frac{NT}{NT + N\tau} = \frac{T}{T + \tau} = \frac{1}{1 + a}$$

dove abbiamo ancora una volta posto $a = \tau/T$.

La dipendenza dal parametro a mostra che anche questo protocollo è strettamente legato, a parità di velocità dei trasmettitori, alla distanza tra le stazioni: per avere una elevata efficienza, cioè un migliore sfruttamento del canale, dovremo avere una rete con piccola copertura geografica, in modo che i tempi morti del canale (cioè i tempi in cui spezzoni di cavo sono inattivi, senza trasmissioni in corso) siano minimi.

SCHEMA FDDI

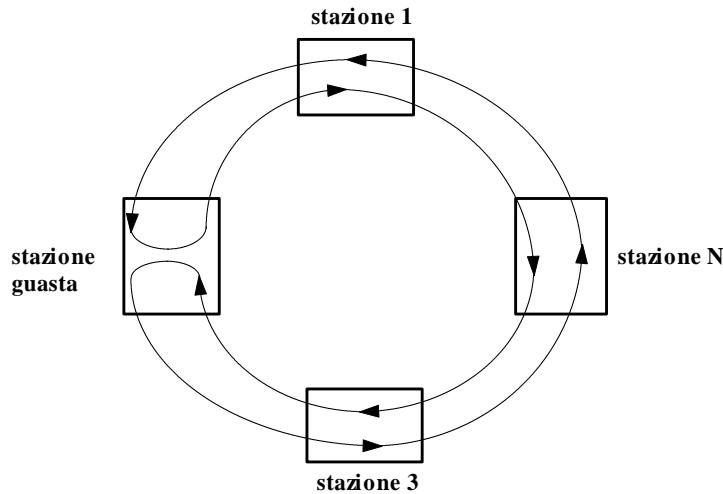
L'**FDDI** è uno standard appositamente definito dall' **ANSI**¹⁷ per le reti locali ad alta velocità basate su fibre ottiche. Sostanzialmente, l'**FDDI** (*Fiber Distributed Data Interface*) è una evoluzione del token-ring. Infatti, osserviamo per prima cosa che la topologia utilizzata è ancora una topologia ad anello (*ring*), con la differenza, però, che gli anelli sono due e che il verso di percorrenza delle informazioni è opposto sui due anelli:



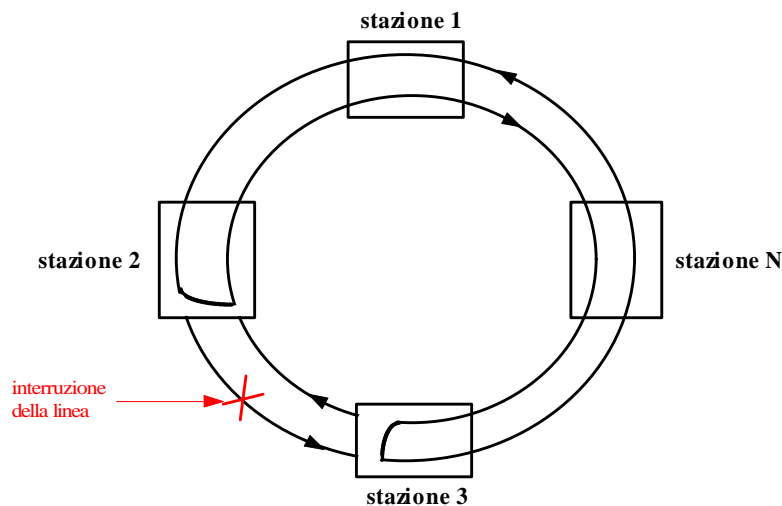
¹⁷ L'acronimo **ANSI** sta per *American National Standards Institution* ed è l'ente che rappresenta gli Stati Uniti nell'**ISO** (**International Standard Organization**), ossia l'agenzia dell'ONU responsabile degli standard internazionali, inclusi quelli delle comunicazioni.

I due cavi sono entrambi monodirezionali ed uno solo di essi viene normalmente usato per la trasmissione. L'altro, di riserva, permette la comunicazione in verso opposto

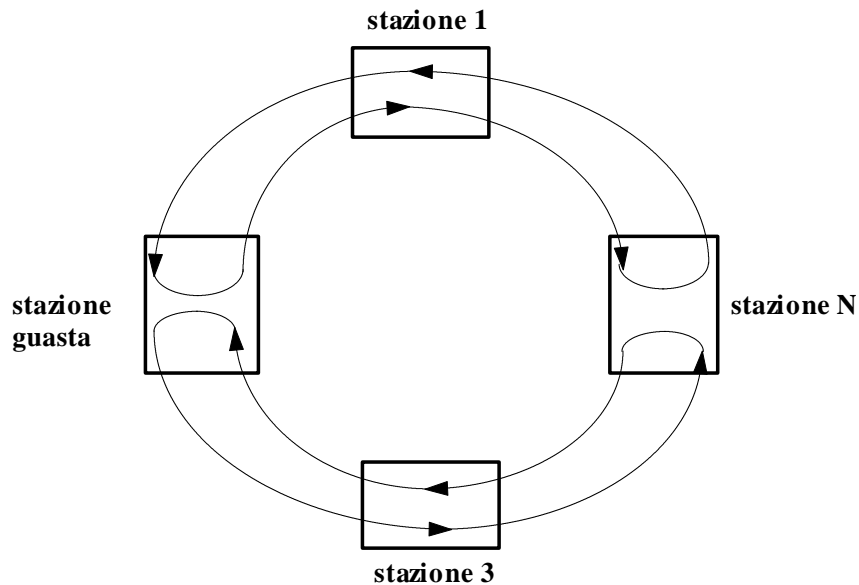
Se una data stazione si guasta o viene volontariamente spenta, i due cavi vengono automaticamente connessi all'interno della stazione stessa, in modo da ricostruire l'anello logico grazie al cavo riserva:



Stesso discorso se è un pezzo di linea che viene a mancare: in questo caso, dato che ciascuna stazione monitora con continuità lo stato delle linee cui è connessa, le stazioni che si trovano ai capi della linea fuori-uso rilevano l'interruzione e provvedono a cortocircuitare i due cavi, in modo da ripristinare l'anello nel modo seguente:



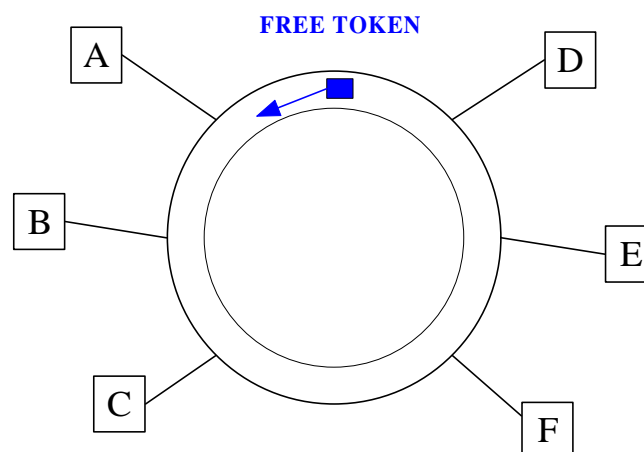
Come abbiamo già avuto modo di dire, il problema fondamentale di questo schema si ha in caso di caduta di due o più stazioni: infatti, in questo caso si formano anelli parziali fra loro non connessi. Ad esempio, se si guastano sia la stazione 2 sia la stazione N, succede quando segue:



Si sono formati due anello, che però non sono connessi tra di loro.

Per ovviare a questo problema, le **reti FDDI**, così come le *token ring*, usano insieme l'accorgimento del doppio anello e quello del **centro stella**, il quale è in grado in ogni momento di monitorare lo stato sia delle linee sia delle stazioni e di prendere gli opportuni accorgimenti per mantenere attivo l'anello logico in caso di malfunzionamenti.

Quindi, l'uso del doppio anello è una prima fondamentale somiglianza tra una rete FDDI ed una rete token ring. Un'altra somiglianza riguarda la tecnica di accesso al mezzo trasmissivo. Infatti, la tecnica usata nelle reti FDDI è una variante del passaggio del token ed è identificata dall'acronimo **E.T.R.** (ossia *Early Token Release*). Secondo questa tecnica, ogni stazione è ancora una volta autorizzata a trasmettere solo quando riceve un *free token*; la differenza, però, rispetto al token ring, è che la stazione può rilasciare il free token appena ha terminato di trasmettere il proprio pacchetto, senza quindi dover aspettare di ricevere lo stesso pacchetto (come invece accadeva nel token ring). La conseguenza di questo fatto è che, in un dato istante, nonostante sia in corso la trasmissione di un pacchetto, ci sia comunque un token libero, il che permette di sfruttare meglio il canale. Per rendercene conto, facciamo un esempio concreto, con riferimento ad uno schema di principio del tipo seguente:



Supponiamo che la stazione A abbia ricevuto un *free token* e lo abbia sfruttato per trasmettere un proprio pacchetto. Essa, quindi, trasmette il pacchetto, al quale accoda non più il busy token, ma un *free-token*. La stazione B, dopo un certo tempo di propagazione τ , riceve il pacchetto da A e lo ritrasmette sulla linea. Subito dopo, riceve anche il free token ed è libera di approfittarne per

trasmettere, perché comunque non ci sarà sovrapposizione con il segnale precedentemente inviato. Il discorso si ripete uguale per le altre stazioni ed è ovvio che si ottenga un miglior sfruttamento del canale. Si può infatti, verificare che l'efficienza di questa tecnica, se N sono le stazioni, è

$$E = \frac{1}{1 + \frac{a}{N}}$$

ed è quindi nettamente superiore rispetto a quella delle reti token ring esaminate in precedenza.

Esistono una serie di varianti a questo schema, nelle quali si cerca essenzialmente di sfruttare l'elevata velocità di trasmissione, che è **100 Mbps**, e la brevità della "lunghezza d'onda" dei bit in trasmissione, che è di circa **2 m**. In particolare, citiamo due importanti possibilità:

- in primo luogo, c'è la possibilità di avere diversi token in circolazione simultanea sulla rete, ossia quindi di autorizzare contemporaneamente, sia pure in ordine opportuno, più stazioni alla trasmissione simultanea;
- in secondo luogo, si può attribuire alla generica stazione il diritto a trasmettere quanti più pacchetti possibile all'interno di un tempo (slot) prefissato, anziché un solo pacchetto alla volta.

Lo svantaggio principale delle reti FDDI è nei costi elevati di implementazione e gestione, in particolare rispetto alle reti basate sulle tecnica CSMA/CD.

Per concludere, ricordiamo che lo standard per reti FDDI prevede un cavo (fibra ottica appunto) che può essere lungo fino a **200 km** e che può collegare fino a **1000 nodi**, distanti non più di **2 km** uno dall'altro.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>