

6

LA RETE ETHERNET E GLI STANDARD IEEE 802.3

6.1 INTRODUZIONE

Nei primi anni '70, tre industrie di alta tecnologia formarono il consorzio DIX per lo sviluppo di una rete locale. DIX, dalle iniziali dei tre membri, Digital Equipment Corp., Intel Corp. e Xerox Corp., lavorò per circa 10 anni su una prima versione di Ethernet, la 1.0, operante a 10 Mb/s.

Nell'anno 1982, DIX pubblicò le specifiche di Ethernet versione 2.0, delle quali riportiamo la copertina di uno dei primi documenti ufficiali (figura 6.1): in quel momento nacque quella che sarebbe diventata la rete locale per antonomasia.

In parallelo il comitato americano IEEE iniziò lo sviluppo dello standard 802.3 che è basato su Ethernet, ma che differisce da questo per alcune caratteristiche logiche, riferite al livello Data Link, ed elettroniche (livello Fisico) riferite ai transceiver ed ai repeater. Nel 1985 lo standard IEEE 802.3 è stato adottato dal comitato tecnico 97 dell'ISO (International Organization for Standardization) come DIS (Draft International Standard) ISO/DIS 8802.3 e nel 1989 approvato come standard ISO 8802.3.

Negli anni successivi il comitato IEEE ha lavorato per migliorare le caratteristiche e la flessibilità del livello fisico del 8802.3, aggiungendo l'uso di diversi mezzi trasmissivi e abbandonando, infine, la tecnica di condivisione della banda trasmissiva, tipica delle LAN, in favore della tecnica Switching per le velocità 2,5, 5, 10, 25, 40, 50, 100, 200 e 400 Gb/s.

I costi ridotti degli apparati e la grande facilità di progettare e realizzare reti di piccole, medie e grandi dimensioni, sono state le chiavi di successo di Ethernet e, sebbene ormai tutti gli apparati in commercio siano conformi alle specifiche 802.3, essi vengono spesso identificati con il nome originale Ethernet.

L'evoluzione di Ethernet degli ultimi 20 anni segna la fine delle LAN e l'impiego delle Switched LAN, per superare i limiti prestazionali e architetturali delle prime, semplificando molto la progettazione delle reti.

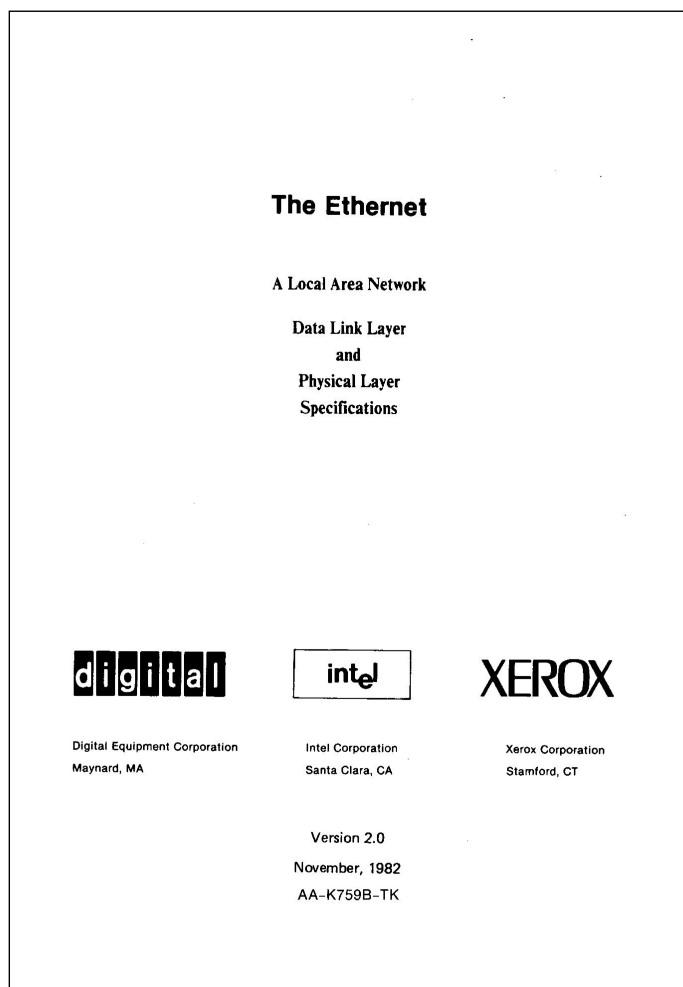


Fig. 6.1- Copertina di uno dei primi documenti sulle specifiche Ethernet

6.2 CENNI STORICI

Nelle prime realizzazioni di reti vennero impiegati apparati conformi alla versione Ethernet 2.0, utilizzando il cavo coassiale Thick e le fibre ottiche multimodali 100/140, abbandonate da molti anni e sostituite da quelle 62,5/125 e 50/125 (si veda il capitolo 4).

I primi utilizzatori delle reti Ethernet furono: le università, i centri di ricerca e le aziende manifatturiere con le reti di stabilimento, in un secondo tempo, anche a fronte dell'abbandono del Token Ring e del fallimento di ATM come soluzione di LAN, Ethernet si impose come unico standard LAN di rete cablata.

A metà degli anni '90 il comitato IEEE 802.3 definì lo standard a 100 Mb/s, denominato 100BASE-TX, che cominciò ad avere delle significative applicazioni nella seconda metà degli anni '90, a seguito della comparsa dei primi switch. Tra la fine degli anni '90 e l'anno 2000 venne standardizzato il GbE (Gigabit Ethernet), dapprima utilizzato su fibre ottiche e, successivamente, anche su cavi rame di categoria 5e. La fine del primo decennio degli anni 2000 vede l'affermarsi dello standard Ethernet a 10 Gb/s (10GbE), utilizzato in un primo tempo per l'interconnessione di switch e, più recentemente, per la connessione di server fisici ad alte prestazioni che possono ospitare vari server virtuali. Nel secondo decennio l'evoluzione è stata incessante e sono stati definiti nuovi standard che coprono le nuove esigenze per connettere tipicamente Server e Storage a 2,5, 5, 10, 25 Gb/s e switch a 40, 100, 200 e 400 Gb/s.

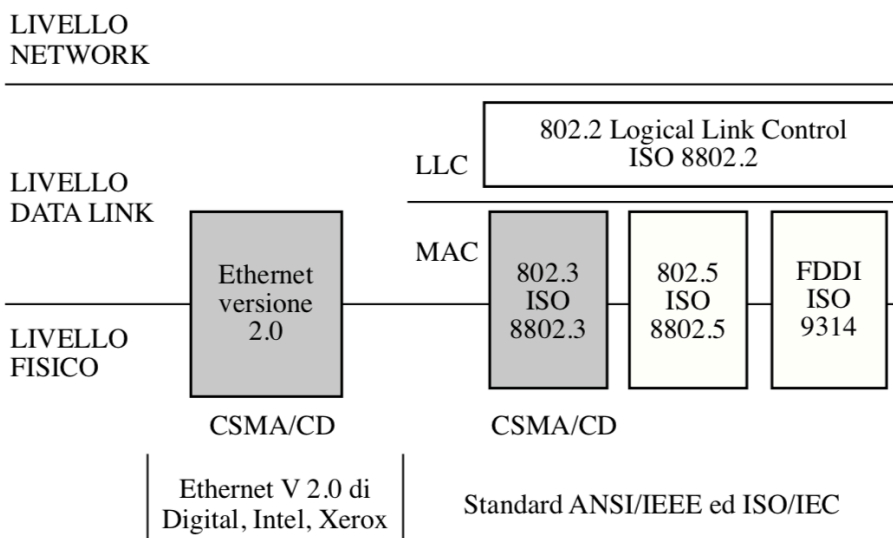


Fig. 6.2 - Relazioni tra i livelli OSI, Ethernet e 802.3

6.3 METODO DI ACCESSO CSMA/CD

Le reti Ethernet e 802.3 sono nate con una topologia a bus basata su cavo coassiale, con velocità trasmissiva di 10 Mb/s, e coinvolgono il livello 1 della pila OSI ed il sottolivello MAC del livello 2 (figura 6.2).

Il MAC (Medium Access Control), cioè il metodo usato per arbitrare l'utilizzo del canale trasmissivo tra le stazioni della rete, è il CSMA/CD, identico in Ethernet e in 802.3. Esso è stato progettato per l'utilizzo del cavo coassiale come mezzo trasmissivo, ma è stato mantenuto inalterato anche in seguito all'introduzione di altri mezzi trasmissivi quali la fibra ottica ed il doppino. CSMA/CD significa Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection e consiste in un protocollo totalmente distribuito, senza stazioni master, per permettere alle stazioni di condividere l'utilizzo del mezzo trasmissivo comune. Poiché, mediante il collegamento a bus del cavo coassiale, i trasmettitori delle stazioni si trovano ad essere "in parallelo", è necessario evitare che più stazioni trasmettano contemporaneamente. Tuttavia, il protocollo non esclude che ciò possa comunque avvenire e prevede un meccanismo di riconoscimento di tale evento, da parte delle stazioni coinvolte, in modo che possano ritentare la trasmissione in un tempo successivo.

Il protocollo CSMA/CD opera in tre diverse fasi:

- *carrier sense* (rilevazione della trasmissione): ogni stazione che deve trasmettere ascolta il bus e decide di trasmettere solo se questo è libero (listen before talking);
- *multiple access*: nonostante il carrier sense, è possibile che due stazioni, trovando il mezzo trasmissivo libero, decidano contemporaneamente di trasmettere; la probabilità di questo evento è aumentata dal fatto che il tempo di propagazione dei segnali sul cavo non è nullo e, quindi, una stazione può credere che il mezzo sia ancora libero anche quando un'altra ha già iniziato la trasmissione;
- *collision detection*: se si verifica la sovrapposizione di due trasmissioni si ha una "collisione"; per rilevarla, ogni stazione, mentre trasmette un pacchetto, ascolta i segnali sul mezzo trasmissivo, confrontandoli con quelli da lei generati (listen while talking).

Le figure 6.3 e 6.4 illustrano una trasmissione senza collisioni ed una trasmissione con collisione. Occorre evidenziare che la collisione non è un errore trasmissivo, ma è banda impiegata per arbitrare il canale. La presenza di un

numero limitato di collisioni, su una rete locale di questo tipo, non è quindi un sintomo di malfunzionamenti, ma è funzionale all'arbitraggio della rete stessa.

A seguito di un'avvenuta collisione si intraprendono le seguenti azioni:

- la stazione trasmittente sospende la trasmissione e trasmette una sequenza di *jamming* (interferenza trasmissiva) composta da 32 bit per 802.3, questa sequenza permette a tutte le stazioni di rilevare l'avvenuta collisione;
- le stazioni in ascolto, riconoscendo il frammento di collisione costituito dalla parte di pacchetto trasmessa più la sequenza di jamming, scartano i bit ricevuti;
- la stazione trasmittente ripete il tentativo di trasmissione dopo un tempo pseudo-casuale per un numero di volte non superiore a 16.

La schedulazione della ritrasmissione in base ad un tempo di attesa pseudo-casuale evita che, dopo una collisione, le stesse stazioni che l'hanno generata ritrasmettano contemporaneamente; il tempo di attesa è determinato da un algoritmo di back-off detto *truncated binary exponential backoff*. Il ritardo è un multiplo intero dello slot time (512 bit, cioè 51,2 μ s alla velocità di 10 Mb/s, 5,12 μ s alla velocità di 100 Mb/s) preso come tempo base e, all' n -esimo tentativo di ritrasmissione, il numero di tempi base r da attendere è scelto casualmente nell'intervallo $0 \leq r < 2^k$, dove $k = \min(n, 10)$.

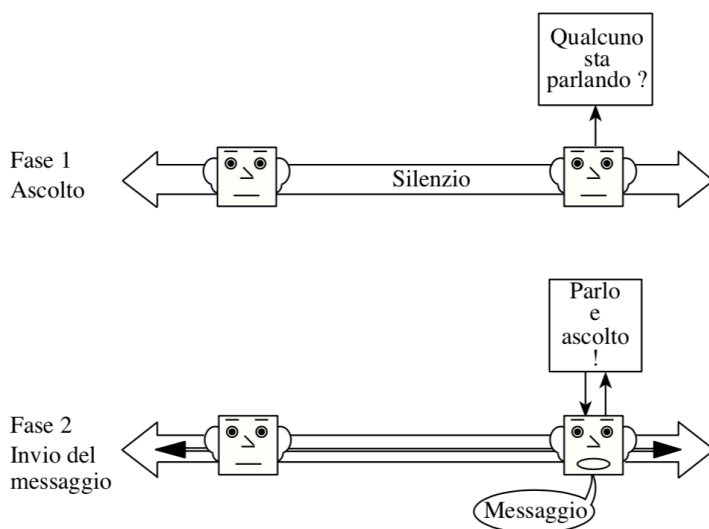


Fig. 6.3 - Trasmissione senza collisione.

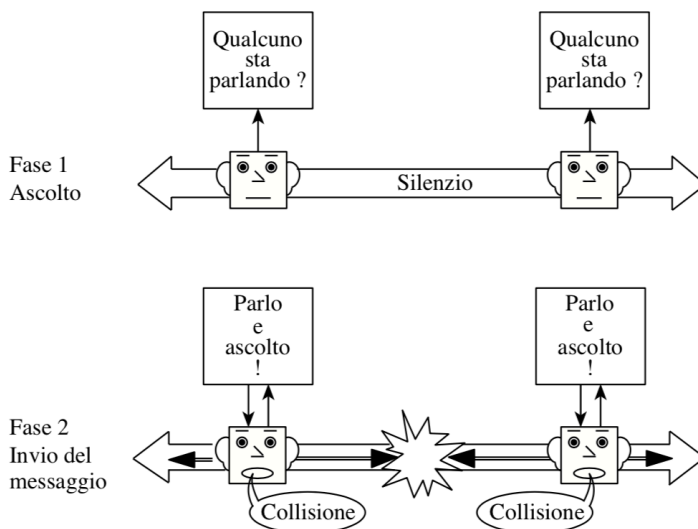


Fig. 6.4 - Trasmissione con collisione

Sebbene oggi le reti siano solo più di tipo switched, può ancora succedere che, per errori di negoziazione tra la scheda di rete dell'apparato e la porta dello switch oppure per errori di configurazione, la connessione risulti di tipo Half-Duplex, quindi operi secondo il MAC CSMA/CD nativo di Ethernet, infatti, se si osservano i parametri di una moderna scheda di rete, si trovano ancora quelli relativi al rilevamento delle collisioni.

Il rilevamento delle collisioni, da parte delle interfacce di rete, considera tre diverse casistiche che rappresentano dei livelli diversi di gravità. Se osserviamo l'esempio riportato nella tabella 6.1, dove abbiamo usato il comando *“ethtool di linux”*, troviamo tre parametri che si riferiscono al rilevamento delle collisioni:

- *“tx_single_collisions”* indica che la trasmissione del pacchetto ha subito una sola collisione;
- *“tx_multi_collisions”* indica che la trasmissione ha subito più di una collisione;
- *“tx_aborted”* indica che a seguito di 16 consecutivi tentativi di trasmissione, dove si sono verificate delle collisioni, è stata abortita la ritrasmissione del pacchetto Ethernet.

```
[root@monitor ~]# ethtool -S eth2
NIC statistics:
    tx_packets: 166
    rx_packets: 514
    tx_errors: 0
    rx_errors: 0
    rx_missed: 0
    align_errors: 0
    tx_single_collisions: 0
    tx_multi_collisions: 0
    unicast: 233
    broadcast: 258
    multicast: 23
    tx_aborted: 0
    tx_underrun: 0
[root@monitor ~]#
```

Tab. 6.1 - Statistiche interfaccia di rete

6.3.1 Caratteristiche funzionali

Il metodo di accesso CSMA/CD è responsabile delle seguenti operazioni:

- trasmissione dei pacchetti: durante questa fase il MAC accetta un pacchetto dal livello superiore e fornisce una stringa seriale di bit al livello fisico per la loro trasmissione sul mezzo fisico;
- ricezione dei pacchetti: durante questa fase il MAC riceve una stringa seriale di bit dal livello fisico e fornisce il pacchetto al livello superiore. Nel caso in cui il pacchetto non sia indirizzato alla stazione ricevente (singolo o multicast), né sia un pacchetto broadcast, viene scartato;
- trasmissione in modalità differita di un pacchetto, quando il canale è occupato;
- generazione del campo FCS per i pacchetti trasmessi;
- controllo del campo FCS in ricezione: il MAC verifica che non ci siano errori nel pacchetto ricevuto confrontando il valore contenuto nel campo FCS del pacchetto ricevuto con quello calcolato localmente. In caso di

errori scarta il pacchetto senza richiederne la ritrasmissione: il MAC gestisce infatti sempre un protocollo non connesso;

- spaziatura dei pacchetti: il MAC garantisce che tra due pacchetti consecutivi intercorra un lasso di tempo minimo pari al parametro che viene identificato con i nomi di Inter-Frame Space (IFS) o Inter-Packet Gap (IPG). Questo tempo serve a delimitare la fine di un pacchetto e a separarlo da quello successivo;
- rilevazione delle collisioni: il MAC interrompe la trasmissione quando rileva una collisione;
- schedulazione delle ritrasmissioni: il MAC schedula la ritrasmissione a seguito di un'avvenuta collisione dopo il periodo di tempo calcolato tramite l'algoritmo di backoff;
- jamming: il MAC trasmette un messaggio di jamming a seguito della rilevazione di una collisione e dopo aver interrotto la trasmissione del pacchetto;
- verifica della lunghezza minima del pacchetto: il MAC scarta i pacchetti ricevuti che hanno una lunghezza inferiore al valore minimo ammesso (64 byte);
- generazione del preambolo: in trasmissione il MAC prepone un preambolo al pacchetto che deve essere trasmesso;
- rimozione del preambolo: in ricezione il MAC rimuove il preambolo.

6.3.2 Collision domain

In una rete CSMA/CD il mezzo trasmissivo è condiviso tra tutte le stazioni che se ne contendono l'utilizzo mediante il protocollo precedentemente descritto e questo insieme prende il nome di Collision Domain.

Nelle reti basate su connessioni point-to-point, tramite doppino, per connettere più stazioni nello stesso Collision Domain si utilizzavano dei multiport repeater, denominati commercialmente "hub". Questi apparati sono ormai scomparsi dal mercato da molti anni e sono stati sostituiti dagli switch, i quali hanno determinato il totale abbandono delle reti condivise, quindi, lo strato protocollare CSMA/CD del livello MAC, presente ancora nei CHIP per le velocità a 10, 100 e 1000 Mb/s, non viene di fatto più utilizzato.

6.3.3 Problemi di rilevamento delle collisioni

In una LAN Ethernet classica, che opera nella modalità CSMA/CD, il corretto rilevamento delle collisioni può presentare dei problemi, in quanto possono essere rilevate delle false collisioni che vengono però trattate dalle schede di rete come se fossero vere. Un rilevamento corretto delle collisioni lo si ha solo nel caso del cavo coassiale, che è un mezzo trasmissivo intrinsecamente Half-Duplex dove, se c'è più di una stazione che trasmette, i relativi transceiver trasmettono una componente di corrente continua, oltre al segnale dei dati, che si traduce in un aumento della tensione continua sul cavo. Quando la componente di tensione continua supera il valore di circa 1,5 V, significa che c'è più di un transceiver che sta trasmettendo sul cavo coassiale e si è, quindi, in presenza di una collisione. La figura 6.5 mostra lo schema di principio della circuiteria di rilevamento della collisione sul cavo coassiale.

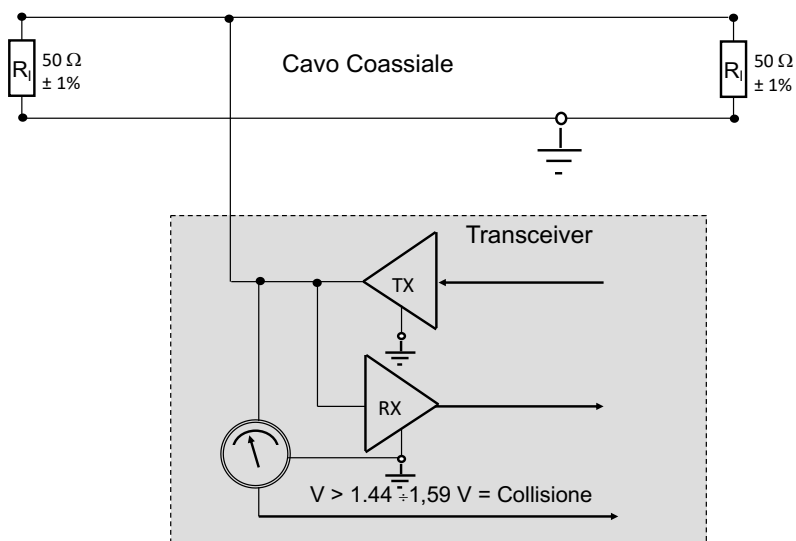


Fig. 6.5 - Rilevamento della collisione su cavo coassiale

Il doppino e le fibre ottiche sono mezzi trasmissivi intrinsecamente Full-Duplex, quindi il corretto rilevamento delle collisioni è più critico. In questi casi la collisione avviene in realtà solo all'interno del ripetitore o hub che mette in comunicazione le varie stazioni, per contro, l'interfaccia di rete della stazione, deve rilevare questa collisione remota per attuare le opportune azioni conseguenti ad essa. Il transceiver dell'interfaccia di rete se rileva presenza di dati nel circuito

RD (Receive Data) mentre sta trasmettendo sul circuito DO (Data Output) assume che si è in presenza di una collisione. Questo assunto è vero solo quando l'interfaccia è configurata per operare in modalità Half-Duplex. La figura 6.6 mostra lo schema di principio della circuiteria di rilevamento della collisione dei transceiver 10BaseT e 100BASE-TX.

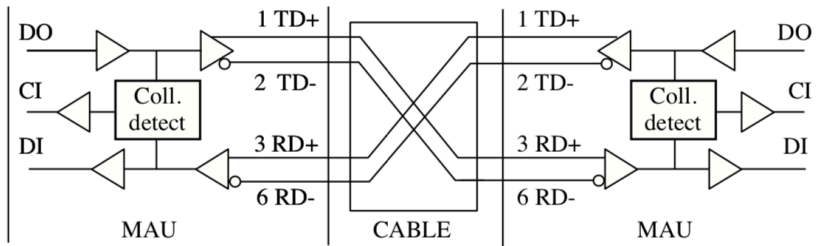


Fig. 6.6 - Rilevamento della collisione sui doppipli

Se in una rete switched due apparati non negoziano correttamente la modalità operativa, può succedere che uno dei due si imponga in modalità Full Duplex, mentre l'altro si imponga in modalità Half Duplex; questa configurazione errata può produrre delle false collisioni nell'apparato che opera in modalità Half Duplex e si possono verificare errori di *tx_single_collisions*, *tx_multi_collision* e *tx_aborted*, creando pertanto forti rallentamenti e anche caduta delle connessioni TCP (Transmission Control Protocol). Lo stesso problema si verifica quando le interfacce di rete di due apparati vengono configurate manualmente in modo non coerente (devono essere entrambe Full Duplex).

6.4 ETHERNET VERSIONE 2.0

Lo standard Ethernet si colloca nei primi due livelli della pila OSI senza seguire gli standard IEEE 802 e, in particolare, senza adottare il protocollo IEEE 802.2 LLC.

La differenza principale è nel diverso tipo di imbustamento, differenza che è importante comprendere in quanto molti protocolli di livello 3 usano questa metodologia di imbustamento invece di usare quella 802.3. L'utilizzo di imbustamento Ethernet è comune anche su hardware 802.3 in quanto è elevato il livello di interoperabilità e di convivenza tra i due standard.

Il livello fisico della versione 2.0 di Ethernet prevedeva l'uso di cavo coassiale di tipo Thick (tipo RG213), denominato anche Cavo Giallo, e di fibra

ottica multimodale per la connessione tra due ripetitori. Il cavo coassiale è stato abbandonato nella seconda metà degli anni 90' in favore del doppino, quindi della versione 2.0 rimangono oggi solo le specifiche di livello MAC e l'utilizzo del formato del pacchetto rappresentato nella figura 6.7.

La figura 6.8 mostra le relazioni tra Ethernet V 2.0 e i livelli di riferimento OSI.

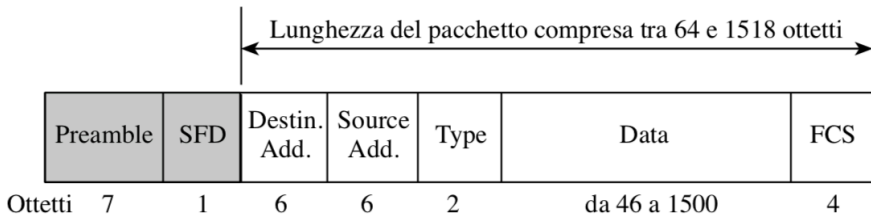


Fig. 6.7 – Formato del pacchetto Ethernet V 2.0

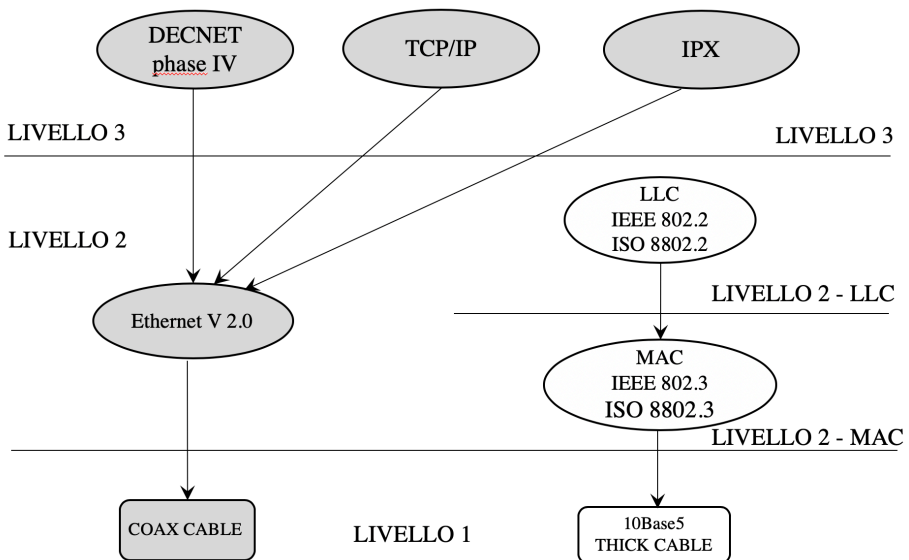


Fig. 6.8 - Relazione tra Ethernet V 2.0 e i livelli OSI

6.4.1 Formato del pacchetto Ethernet V 2.0

Il pacchetto Ethernet (figura 6.7) ha una lunghezza variabile compresa tra 64 e 1518 ottetti.

In testa al pacchetto c'è un preambolo di 7 ottetti (sequenza alternata di uni e di zeri) che serve alla stazione ricevente per sincronizzarsi sul clock di quella trasmittente; immediatamente dopo c'è un ottetto di *SFD* (*Start Frame Delimiter*, corrispondente alla sequenza di bit 11010101) che indica l'inizio del pacchetto.

Nel campo di *destination address* è contenuto l'indirizzo della stazione a cui è destinato il pacchetto, e nel campo di *source address* è contenuto l'indirizzo della stazione che ha generato il pacchetto.

Nel campo *type* è contenuto il codice associato al protocollo di livello superiore che ha generato la PDU (*Protocol Data Unit*) contenuta nel campo *data* (i valori possibili per tale campo sono riportati in appendice A, paragrafo A.2).

Il campo FCS (*Frame Check Sequence*) contiene il valore di CRC (*Cyclic Redundancy Check*) calcolato sulla base dei campi descritti precedentemente.

Si noti che non esiste un segnalatore di fine pacchetto: tale ruolo è assunto dall'IPG (*Inter-Packet Gap*), la cui durata è pari a 96 bit time che corrispondono a 9.6 μ s.

6.5 LO STANDARD IEEE 802.3/ISO 8802.3

Lo standard IEEE 802.3 si colloca al livello 1 della pila OSI e al sottolivello MAC del livello 2, mentre il Logical Link Control (LLC) è demandato allo standard IEEE 802.2. La figura 6.9 mostra le relazioni tra i livelli di riferimento OSI.

IEEE 802.3 nasce come architettura a bus su cavo coassiale ed evolve, successivamente, verso topologie a stella basate sull'utilizzo di cavi UTP e fibre ottiche. Le specifiche del livello MAC, per le velocità comprese tra 10 Mb/s e 1Gb/s, prevedono la condivisione del mezzo trasmissivo attraverso l'uso del protocollo CSMA/CD, sebbene, dall'inizio degli anni 2000, questo non sia più utilizzato, in quanto le reti sono di tipo switched. Le specifiche del livello MAC, per velocità comprese tra 2,5 Gb/s e 400 Gb/s, hanno abbandonato il protocollo CSMA/CD, pertanto, impongono l'uso della tecnica trasmissiva switching.

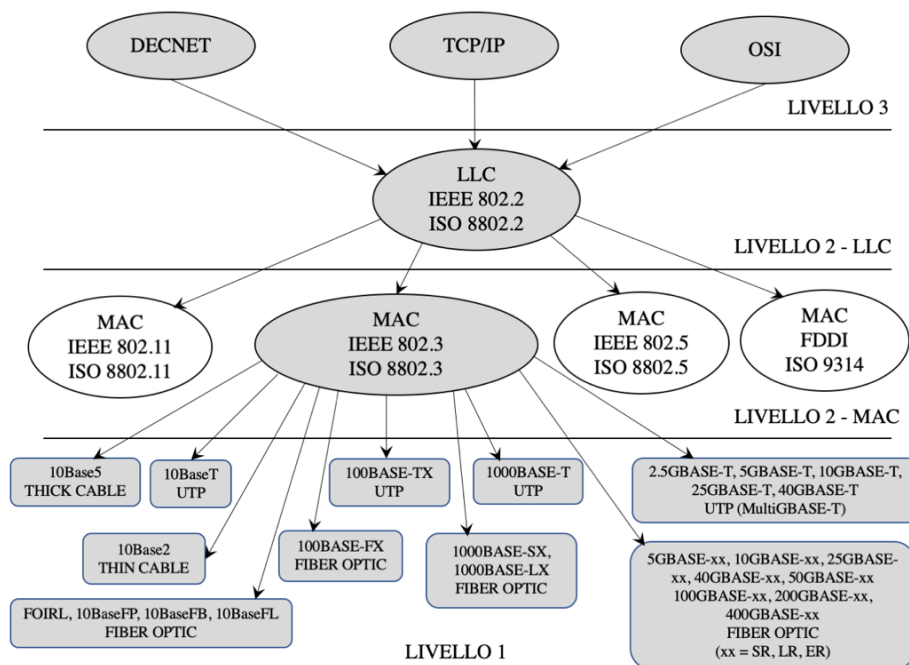


Fig. 6.9 – Relazione tra 802.3 e i livelli OSI

6.5.1 Sottolivello MAC

Le principali funzioni dello standard 802.3 relative al sottolivello MAC sono quelle già descritte nel paragrafo 6.3.

Il pacchetto 802.3 (figura 6.9) ha una lunghezza variabile compresa tra 64 e 1518 ottetti, in testa al pacchetto c'è un preambolo di 7 ottetti che serve alla stazione ricevente per sincronizzarsi sul clock di quella trasmittente, immediatamente dopo c'è un ottetto di SFD (codificato con la sequenza di bit 11010101) che indica l'inizio del pacchetto.

Nel campo di *destination address* è contenuto l'indirizzo della stazione a cui è destinato il pacchetto, nel campo di *source address* è contenuto l'indirizzo della stazione che ha originato il pacchetto.

Il campo di *length* indica il numero di ottetti contenuti nel campo data, il PAD (*Packet Assembler/Disassembler*) viene appeso in coda al precedente campo solo se quest'ultimo è più corto di 46 ottetti e contiene un numero di ottetti calcolato in modo da garantire che venga rispettata la lunghezza minima del pacchetto (64 ottetti).

Il campo *data* contiene le LLC-PDU, il campo FCS (*Frame Check Sequence*) contiene il valore di CRC calcolato sulla base dei campi descritti precedentemente.

Come in Ethernet 2.0, non esiste un segnalatore di fine pacchetto: tale ruolo è assunto dall'*Inter-Packet Gap*, la cui durata non può quindi scendere sotto il valore minimo fissato in 96 bit time. Lo spazio temporale minimo tra due pacchetti consecutivi è dipendente dalla velocità trasmissiva, quindi 96 bit time corrispondono a 9,6 μ s a 10 Mb/s, 960 ns a 100 Mb/s, 96 ns a 1 Gb/s, 9,6 ns a 10 Gb/s e così via per le altre velocità. Si noti come la distanza minima in termini temporali tra due pacchetti consecutivi si riduca molto all'aumentare della velocità trasmissiva.

Una stazione o un apparato di rete si dice che trasmette a *wire speed* (massima efficienza trasmissiva) quando l'elettronica è così efficiente da introdurre l'IPG minimo tra i pacchetti di lunghezza minima. L'efficienza trasmissiva viene espressa in *pps* (*packets per second*) e viene valutata con i pacchetti di lunghezza minima di 64 ottetti. La tabella 6.3 mostra i diversi valori di pps in base alle diverse lunghezze di pacchetti e alla velocità trasmissiva.

I parametri principali del sottolivello MAC sono i riportati in tabella 6.2.

Slot time	512 bit time	tempo base di attesa prima di una ritrasmissione
Inter Frame Spacing	96 bit time	distanza minima tra due pacchetti
Attempt limit	16	massimo numero di tentativi di ritrasmissione
Backoff limit	10	numero di tentativi oltre il quale non aumenta più la casualità del back-off
Jam size	32 bit	lunghezza della sequenza di jam
Max frame size	1518 ottetti	lunghezza massima del pacchetto
Min frame size	64 ottetti (512 bit)	lunghezza minima del pacchetto
Address size	48 bit	lunghezza indirizzi MAC

Tab. 6.2 - IEEE 802.3: principali parametri

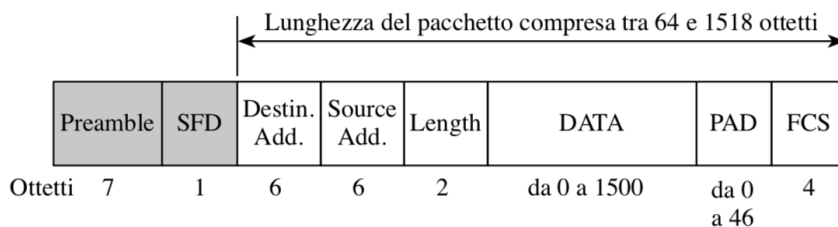


Fig. 6.9 – Formato del pacchetto IEEE 802.3

Velocità Ethernet	64 ottetti - pps	750 ottetti - pps	1518 ottetti - pps
10 Mb/s	14.880	1.623	812
100 Mb/s	148.800	16.234	8.120
1 Gb/s	1.488.000	162.338	81.200
10 Gb/s	14.880.000	1.623.377	812.000
25 Gb/s	37.200.000	4.058.442	2.030.000
40 Gb/s	59.520.000	6.493.506	3.248.000
50 Gb/s	74.400.000	8.116.883	4.060.000
100 Gb/s	148.800.000	16.233.766	8.120.000

Tab. 6.3 – Prestazioni trasmissive massime di Ethernet (IPG 96 bit time)

Man mano che si cresce in velocità è sempre più difficile per l'elettronica inserire il valore minimo di IPG tra i pacchetti, il quale impatta notevolmente su una trasmissione continua di pacchetti da 64 ottetti (512 bit), ma nella realtà la lunghezza media dei pacchetti che transitano in una rete è di circa 750 ottetti (6000 bit). All'aumento della lunghezza del pacchetto corrisponde un minor impatto dell'IPG sulle prestazioni globali di Ethernet anche quando questo ha un valore superiore a 96 bit time.

Mettiamo a confronto le tabelle 6.3 e 6.4, dove in quest'ultima le prestazioni sono calcolate considerando un IPG di 300 bit time che, alla velocità di 100 Gb/s, corrisponde a 3 ns, si noti quindi come questo su pacchetti da 64 ottetti comporti una diminuzione dell'efficienza pari a circa il 23%, il 6% su pacchetti da 750 ottetti, e solo il 2% su pacchetti da 1518 ottetti.

Velocità Ethernet	64 ottetti - pps	750 ottetti - pps	1518 ottetti - pps
10 Mb/s	11.416	1.571	799
100 Mb/s	114.155	15.713	7.995
1 Gb/s	1.141.553	157.134	79.949
10 Gb/s	11.415.525	1.571.339	799.488
25 Gb/s	28.538.813	3.928.347	1.998.721
40 Gb/s	45.662.100	6.285.355	3.197.953
50 Gb/s	57.077.626	7.856.694	3.997.442
100 Gb/s	114.155.251	15.713.388	7.994.883

Tab. 6.4 – Prestazioni trasmissive di Ethernet con IPG di 300 bit time

6.6 CONVIVENZA DI ETHERNET E IEEE 802.3

Sino a questo punto le reti locali Ethernet V 2.0 e IEEE 802.3 sono state descritte come delle realtà simili, ma distinte. In pratica, è però molto comune trovare delle reti miste e, in particolare, è oggi molto diffusa la situazione in cui l'hardware è conforme allo standard IEEE 802.3 e continua ad evolvere in termini di velocità trasmissive, ma il formato dei pacchetti continua ad essere quello di Ethernet V 2.0. Questo non crea alcun problema alle schede poiché in fase di ricezione si è comunque in grado di distinguere i due tipi di pacchetti.

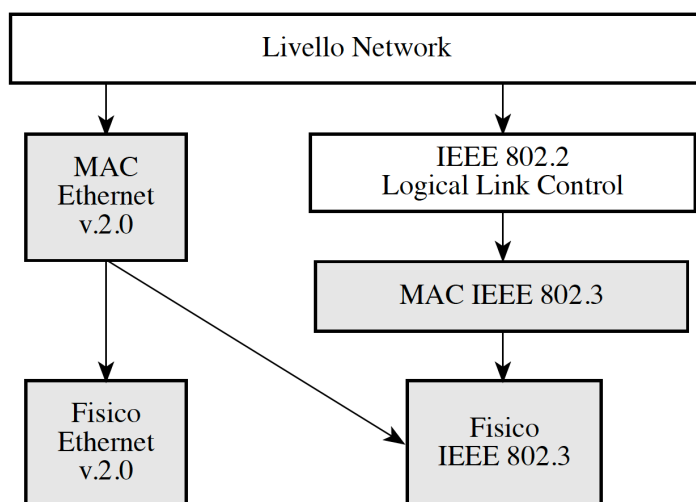


Fig. 6.10 – Convivenza Ethernet V 2.0 e IEEE 802.3

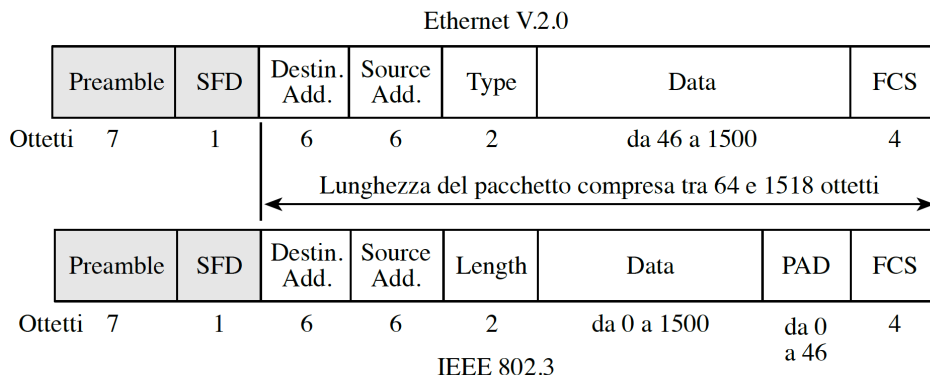


Fig. 6.11 – Pacchetti Ethernet e 802.3 a confronto

Per meglio comprendere questo punto consideriamo come i protocolli di livello superiore si appoggiano sulle due reti locali (figura 6.10).

Come risulta evidente dalla figura 6.11, nel caso di Ethernet la PDU di livello 3 è contenuta direttamente nel pacchetto MAC, mentre nel caso 802.3 la PDU di livello 3 è contenuta nella PDU di livello LLC e quest'ultima è contenuta nel campo dati MAC.

Per capire come una scheda di rete locale discrimina in fase di ricezione i pacchetti Ethernet da quelli 802.3, si analizzi la figura 6.11 che mostra entrambi i pacchetti. Il primo campo diverso è quello lungo 2 byte che in Ethernet assume il significato di *protocol type* e in 802.3 quello di *length*. Gli insiemi di valori ammissibili nei due casi sono disgiunti, in 802.3 il campo length può assumere valori nell'intervallo 0-1500, mentre le codifiche di protocol type in Ethernet sono tutte maggiori o uguali a 1536.

6.7 VLAN TAGGING

Nell'anno 1998 la definizione delle VLAN nello standard 802.1Q e della funzione di priorità del traffico nello standard 802.1p, richiese l'aggiunta di informazioni (tag) nel formato del pacchetto, quindi, è stato emanato lo standard 802.3ac nel quale è stato aggiunto il campo *Tagging*, che significa marcatura.

In Ethernet V 2.0 e 802.3 nei due ottetti successivi al campo Source Address viene inserito il codice “81-00”, al posto del campo Type in Ethernet V 2.0 o Legth in 802.3, il quale indica che nei successivi 2 ottetti c’è il campo “*Tag Control Information*”, dopo questo viene messo il campo Type/Legth (figura 6.12).

Il campo Tag Control Information, quando è presente, contiene i seguenti sottocampi:

- *user priority* contiene la priorità con la quale il pacchetto deve essere trattato;
- *VID (VLAN ID)* contiene il numero che identifica la VLAN cui il pacchetto appartiene. I valori assegnabili sono compresi tra 1 e 4094. Il valore zero indica che il pacchetto non ha informazioni riguardanti le VLAN, ma solo la priorità, il valore 1 è assegnato alla VLAN di default e il valore 4095 è riservato;
- *CFI (Canonical Format Information)* non viene illustrato in quanto non rilevante ai fini di questa trattazione.

Quando il pacchetto contiene le informazioni di Tagging può avere una lunghezza massima di 1522 ottetti.

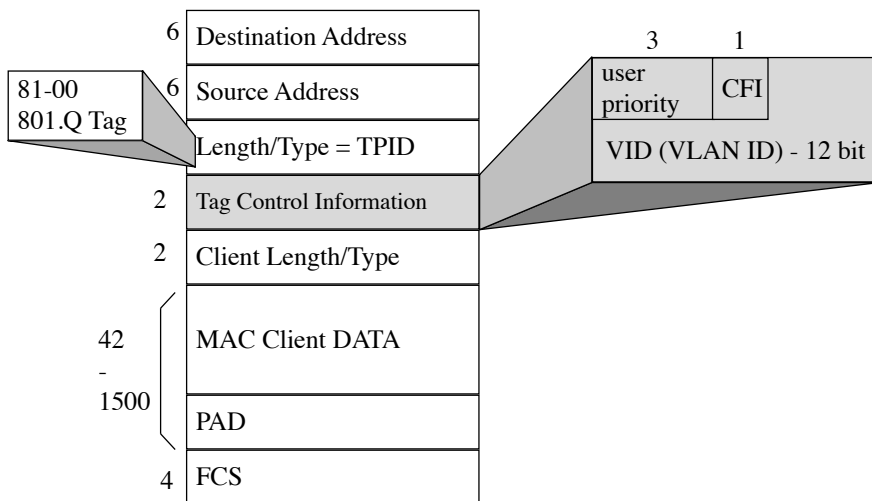


Fig. 6.12 – Formato del pacchetto inclusivo del Tagging

6.8 IL LIVELLO FISICO E LE EVOLUZIONI

Il livello Fisico si occupa principalmente di codificare i pacchetti in stringhe seriali di bit e decodificare stringhe seriali di bit in pacchetti. Nel livello Fisico sono contenute le caratteristiche dei segnali e degli elementi che vi operano quali transceiver, ripetitori, cavi e connettori.

Lo standard 802.3 ha avuto molte evoluzioni del livello Fisico, passando dai 10 Mb/s a 400 Gb/s e coinvolgendo pesantemente i sistemi di cablaggio basati sia su doppini, sia su fibre ottiche.

6.8.1 Repeater 802.3

Il ripetitore lavora a livello Fisico e ripete i segnali, ricevuti su un segmento, a tutti gli altri segmenti; la figura 6.13 mostra il ruolo di un ripetitore per l'interconnessione di due segmenti all'interno del modello di riferimento OSI.

Sebbene le reti Ethernet non siano più di tipo condiviso da più di 20 anni, e non facciano quindi uso di ripetitori, è utile conoscerne i principi di funzionamento per l'impatto che ha sull'auto-negoziamento dei parametri di rete.

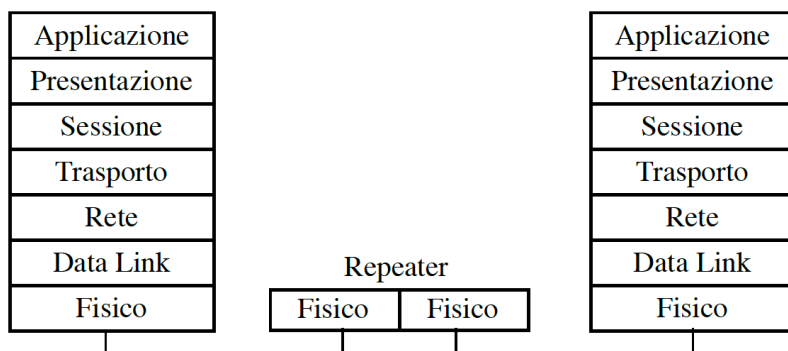


Fig. 6.13 – Relazione tra un ripetitore ed i livelli OSI.

Le funzioni principali di un ripetitore 802.3 sono le seguenti:

- ripete le stringhe di bit ricevuti su un segmento e le trasmette sugli altri segmenti con un'ampiezza di segnale appropriata;
- assicura che la simmetria dei segnali sia entro la tolleranza richiesta dalle specifiche del MAU (Media Access Unit/transceiver);

- decodifica, secondo il metodo Manchester, le stringhe seriali di bit ricevute su una porta e le ricodifica prima di ritrasmetterle sulle altre porte, ritemporizzando quindi tutti i bit da trasmettere;
- si occupa della gestione della collisione: se viene rilevata su una qualunque porta, il ripetitore trasmette la sequenza di jam di 96 bit su tutte le porte; tale sequenza serve a garantire la propagazione della collisione su tutti i segmenti;
- rigenera il preambolo: il ripetitore deve trasmettere un minimo di 56 bit di preambolo seguiti dallo SFD;
- quando riceve un frammento di collisione inferiore a 96 bit, incluso il preambolo, estende questo frammento con una sequenza di jam in modo che il numero di bit ritrasmessi sia uguale a 96;
- protegge i segmenti connessi ad esso da errori di jabber (pacchetti troppo lunghi); quando si accorge che sta trasmettendo una stringa di bit per un periodo continuativo superiore a 5 ms, interrompe la trasmissione e la riabilita dopo un tempo che va da 9.6 a 11.6 ms;
- può opzionalmente isolare una porta (e quindi partizionare la rete), per un determinato periodo di tempo, quando su questa si verificano più di 30 collisioni consecutive;
- I ripetitore può ospitare al suo interno i transceiver integrati.

6.8.2 Gli standard di livello fisico basati sul doppino

Gran parte del successo di Ethernet/802.3 è dovuto all'abbandono del cavo coassiale in favore del doppino di tipo telefonico. Bisogna pertanto ricordare che questo successo lo si deve in modo particolare all'azienda americana David System che, verso la fine degli anni '80, sviluppò la tecnologia della trasmissione su doppino. I fondatori di quest'azienda alcuni anni dopo fondarono una startup, denominata Crescendo, che sviluppò la tecnica di codifica MLT-3 (Multi-Level Transmit) la quale venne dapprima usata dallo standard FDDI (Fiber Distributed Data Interface) per trasmettere 100 Mb/s su cavi di categoria 5 e, successivamente, venne adottata anche da Ethernet con lo standard 100BASE-TX. La velocità di 100 Mb/s, l'affermarsi della tecnologia switching, con il conseguente abbandono della modalità di trasmissione condivisa CSMA/CD, nella seconda metà degli anni '90, determinarono in gran parte la fine del Token Ring e il successo indiscutibile di Ethernet.

Tutti gli standard di livello fisico basati su doppino hanno la presenza della lettera “T” nel loro acronimo dove, questa lettera, sta ad indicare che si trasmette su doppino con coppie ritorte (Twisted Pair).

Gli standard 10BaseT (10 Mb/s) e 100BASE-TX (100 Mb/s) utilizzano in modo analogo l'accoppiamento presa/connettore RJ45 (figura 6.14), ma mentre per il primo sarebbe sufficiente la componentistica (cavi, prese, connettori) di categoria 3, per il secondo è necessario utilizzare componentistica di categoria 5 o superiore. La lunghezza massima ammessa per il canale trasmissivo è 100 m (figura 6.15).

La trasmissione a 100 Mb/s usa la codifica 4B5B, derivata dalle specifiche di livello fisico di FDDI, dove 4 bit del livello MAC vengono convertiti a livello fisico in simboli di 5 bit. La ridondanza di un bit a livello fisico migliora la sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore e permette anche di codificare particolari stati che non sono dati. Per effetto della codifica 4B5B la trasmissione di simboli a livello fisico è pari a 125 Mb/s.

Nell'anno 1999 il comitato IEEE 802.3 ha emesso la standard 1000BASE-T (1000 Mb/s = 1 Gb/s) su doppino di categoria 5 con le raccomandazioni del bollettino tecnico TIA/EIA TSB95, successivamente sostituito dal doppino di categoria 5E.

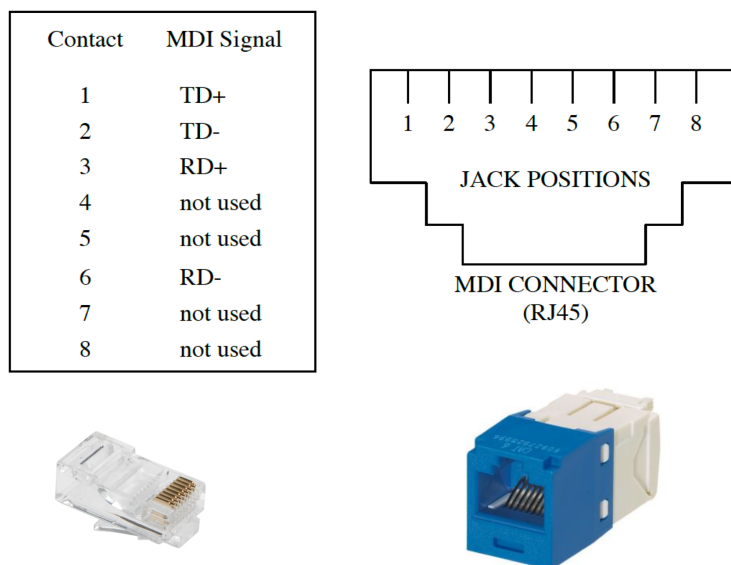


Fig. 6.14 – RJ45 pin assignment 10BaseT e 100BASE-TX

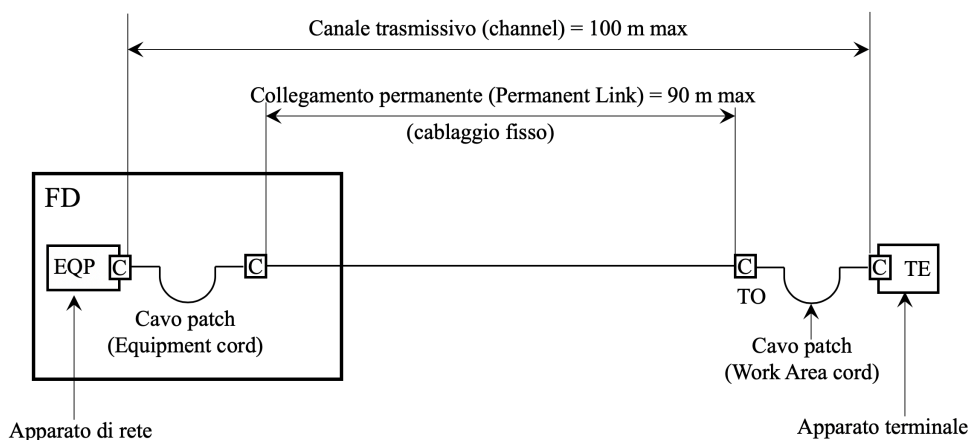


Fig. 6.15 – Lunghezza massima canale trasmissivo

La trasmissione a 1000 Mb/s usa la codifica 8B10B, derivata dalle specifiche di livello fisico di Fibre Channel, dove 8 bit del livello MAC vengono convertiti a livello fisico in simboli di 10 bit. Per effetto della codifica 8B10B la trasmissione di simboli a livello fisico è pari a 1250 Mb/s.

A differenza degli standard 10BaseT e 100BASE-TX, lo standard 1000BASE-T usa tutte le 4 coppie presenti nel cablaggio su RJ45. L'elettronica usa dei componenti ibridi e dei cancellatori che consentono una trasmissione Full Duplex, permettendo che i bit vengano trasmessi e ricevuti sulle stesse coppie di fili contemporaneamente, dove in ognuna di loro vengono trasmessi 250 Mb/s (figura 6.16).

Le quadruple trasmesse sulle 4 coppie vengono denominate con le lettere seguenti (figura 6.17):

- "A" che viene trasmessa sui pin 1 e 2;
- "B" che viene trasmessa sui pin 3 e 6;
- "C" che viene trasmessa sui pin 4 e 5;
- "D" che viene trasmessa sui pin 7 e 8.

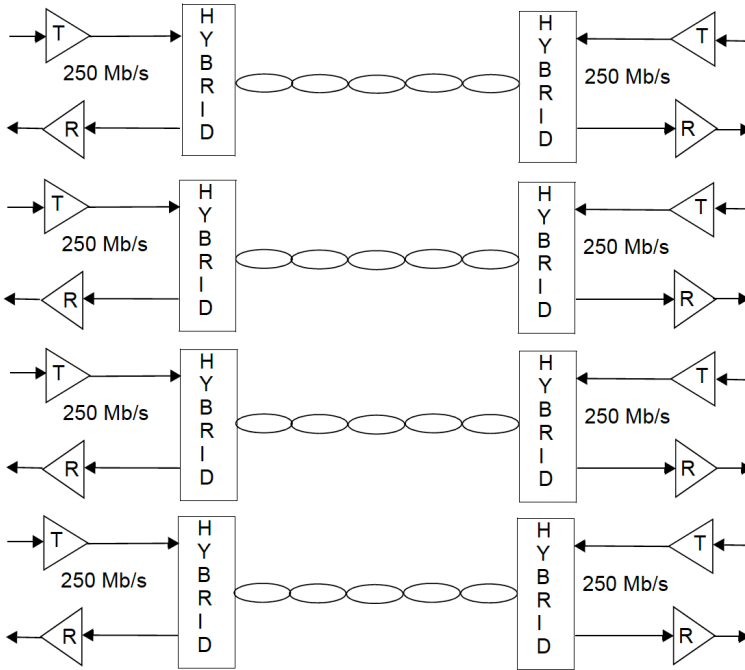


Fig. 6.16 – Circuiteria 1000BASE-T

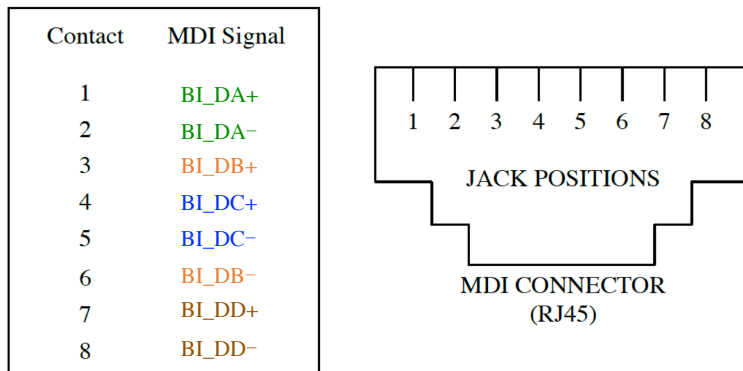


Fig. 6.17 – 1000BASE-T pin assignment

Nel primo ventennio degli anni 2000 assistiamo ad uno sviluppo sempre più sofisticato e complesso delle tecniche di codifica delle stringhe seriali di bit, che permisero ad Ethernet di utilizzare il cablaggio strutturato per velocità fino a 10

Gb/s su distanze massime di 100 m e di soli 30 m per le velocità 25 e 40 Gb/s (figura 6.18 e tabella 6.5).

Lo standard prevede la possibilità di avere dei multi-gigabit transceiver (MGT), denominati “MultiGBASE-T”, i quali possono negoziare diverse velocità comprese tra 2,5 e 40 Gb/s, ovviamente, bisogna considerare le limitazioni sulla lunghezza massima del canale trasmissivo per le velocità 25 e 40 Gb/s (tabella 6.5).

Le velocità 2.5 e 5 Gb/s vengono principalmente utilizzate per la connessione di Access Point ad alte prestazioni, più raramente per i Server presenti nei Data Center, i quali dispongono normalmente di schede di rete in fibra ottica a 10 e 25 Gb/s.

Gli standard MultiGBASE-T usano la stessa tecnica trasmissiva dello standard 1000BASE-T rappresentata nelle figure 6.16 e 6.17, ma cambia la velocità di trasmissione:

- 2.5GBASE-T trasmette 625 Mb/s su ogni coppia;
- 5GBASE-T trasmette 1250 Mb/s su ogni coppia;
- 10GBASE-T trasmette 2500 Mb/s su ogni coppia;
- 25GBASE-T trasmette 5000 Mb/s su ogni coppia;
- 40GBASE-T trasmette 10000 Mb/s su ogni coppia.

Attualmente, la preferenza nei Data Center consiste nel collegare i Server in fibra ottica per le seguenti ragioni:

- le Motherboard dei server tipicamente non dispongono di LOM (LAN-On-Motherboard) a 10 Gb/s o 25 Gb/s per l'elevato consumo elettrico, e l'elevata dissipazione di calore, che richiederebbe l'uso di radiatori e ventole di raffreddamento (figura 6.19). Normalmente le Motherboard dei server dispongono di LOM con 2 o 4 porte 1000BASE-T;
- l'elevato costo di questi potenti Server non giustifica il modesto risparmio di una scheda di rete 10GBASE-T o 25GBASE-T rispetto a quella con la porta in fibra ottica.

Per le ragioni citate gli standard 10GBASE-T e 25GBASE-T non hanno avuto, per il momento, un grande successo.

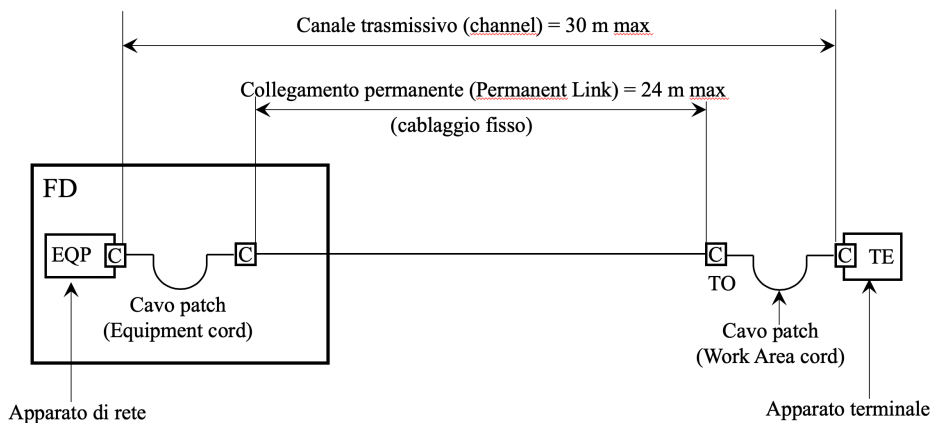


Fig. 6.18 – Lunghezza massima canale trasmissivo 25GBASE-T e 40GBASE-T



Fig. 6.19 – Scheda Intel X520-T2 (Dual Port 10GBASE-T)

La tabella 6.5 mostra i requisiti minimi del cablaggio rame su doppino per i vari standard di livello fisico.

Standard	L. max	Cabl. Requisiti min.
10BaseT	100 m	Cat. 3
100BASE-TX	100 m	Cat. 5
1000BASE-T	100 m	Cat. 5E
2.5BASE-T	100 m	Cat. 6A
5GBASE-T	100 m	Cat. 6A
10GBASE-T	100 m	Cat. 6A
25GBASE-T	30 m	Cat. 8
40GBASE-T	30 m	Cat. 8

Tab. 6.5 – Requisiti minimi per il cablaggio rame su doppino

6.8.3 Gli standard di livello fisico basati sulla fibra ottica

Le connessioni in fibra ottica vennero dapprima usate per connettere i ripetitori su distanze massime di 2000 m, ma dopo la seconda metà degli anni 80' vennero usate anche per connettere direttamente stazioni ed apparati di rete di vario genere come bridge, router, switch e firewall.

A seconda delle distanze da coprire e delle velocità trasmissive sono stati definiti diversi standard di livello fisico che impiegano fibre ottiche multimodali (MM = Multi Mode) o monomodali (SM = Single Mode).

I vari standard per la fibra ottica riferiti alla velocità di 10 Mb/s: FOIRL (Fiber-Optic Inter-Repeater Link), 10BASE-FL, 10BASE-FB e 10BASE-FP (figura 6.9) non vengono più utilizzati da circa 20 anni. La velocità più bassa utilizzata è 100 Mb/s, la quale è però relegata alle applicazioni di automazione industriale dove non sono tipicamente richieste elevate velocità. Al contrario, negli edifici la velocità minima che si trova nei collegamenti delle dorsali è 1 Gb/s.

L'incremento continuo delle velocità trasmissive richiederà sempre di più l'impiego di fibre ottiche monomodali, perché hanno bande passanti molto più elevate di quelle multimodali, permettono di raggiungere maggiori distanze, sono più adeguate alla trasmissione su diverse lunghezze d'onda sulla medesima fibra con la tecnica WDM (Wavelength Division Multiplexing) e presentano minor effetti di distorsione del segnale ottico alle alte velocità rispetto alle fibre ottiche multimodali.

L'Ethernet su fibra, come quello su doppino, ha beneficiato di tecniche di codifica di bit a livello MAC a simboli di livello fisico derivate da altri standard quali: la codifica 4B5B, sviluppata in FDDI, e quella 8B10B, sviluppata in Fibre Channel, con un incremento del 25% della velocità dei simboli trasmessi a livello fisico rispetto ai bit del livello MAC.

I connettori usati per le connessioni in fibra sono cambiati nel tempo, dapprima nella versione a 10 Mb/s vennero usati i connettori a baionetta ST, sostituiti poi dai connettori SC e, infine, con i connettori più compatti LC mentre, per il cablaggio parallelo, sono stati adottati i connettori MPO (figura 6.20).

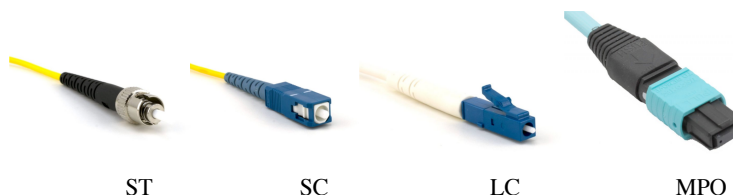


Fig. 6.20 – Connettori per fibra ottica

Negli standard delle reti non si butta via niente e si riutilizzano spesso specifiche sviluppate in precedenti e diversi standard, infatti, un grande impulso al successo di Ethernet lo si deve anche al fatto di aver riutilizzato le specifiche di livello fisico di FDDI sia per la parte rame, sia per la fibra, con gli standard 1000BASE-SX e 1000BASE-LX.

Nell'anno 1999 venne approvato lo standard 802.3z che prevedeva l'uso della fibra ottica a 1 Gb/s e, nei primi anni 2000, vennero realizzate le prime connessioni di dorsale in fibra ottica negli edifici a questa velocità, ma molti cablaggi erano ancora stati realizzati con le vecchie fibre ottiche di tipo OM1. Queste ultime limitano la distanza massima a 275 m (tabella 6.6) e, in alcuni casi, la lunghezza della fibra poteva arrivare intorno ai 500 m, quindi, lo standard per evitare di dover ricablare interi comprensori sviluppò una soluzione intelligente, dove si poteva trasmettere con i transceiver basati su Laser a 1300 nm (1000BASE-LX), sulla fibra ottica multimodale OM1, inserendo un particolare cavetto di adattamento tra l'apparato di rete e il cassetto ottico di terminazione del cablaggio denominato "Mode Conditioning Patch Cord" (figura 6.21). In questo cavetto una delle due fibre ottiche multimodali viene giuntata ad una fibra ottica multimodale con un piccolo disallineamento dei due core che serve per utilizzare i diversi modi di propagazione del segnale ottico (si veda il capitolo 3). Il connettore terminato sulla fibra ottica monomodale deve essere inserito nell'alloggiamento che emette il segnale ottico (figura 6.21).

L'acronimo di ogni standard di livello fisico contiene l'informazione della velocità trasmissiva, del tipo di fibra ottica e della lunghezza d'onda utilizzata dai componenti trasmettitori e ricevitori:

- 100BASE-FX indica la velocità di 100 Mb/s su fibra ottica multimodale, in ambito LAN lo standard, per questa velocità, non prevede l'uso di fibra ottica monomodale;

- 1000BASE-SX indica la velocità di 1000 Mb/s su fibra ottica multimodale (la lettera “S” indica Short Wave, ovvero 850 nm);
- 1000BASE-LX indica la velocità di 1000 Mb/s su fibra ottica monomodale (la lettera “L” indica Long Wave, ovvero 1300 nm);
- L’acronimo GBASE è riferito alle velocità superiori a 1 Gb/s e il numero precedente indica la velocità espressa in Gb/s:
 - la lettera “S” (Short Wave) indica che il transceiver opera ad una lunghezza d’onda di 850 nm e la fibra ottica è di tipo multimodale;
 - la lettera “L” (Long Wave) indica il transceiver che opera ad una lunghezza d’onda di 1310 nm e la fibra ottica è di tipo monomodale;
 - la coppia di lettere “ER” (Extended Range) indica il transceiver che opera ad una lunghezza d’onda di 1550 nm, la fibra ottica è di tipo monomodale e la distanza tra due apparati è notevolmente elevata;
- Ci sono infine standard su fibra ottica monomodale che hanno potenza del laser e distanza massima ridotte, ma costi inferiori ed è il caso di: 40GBASE-FR e 50GBASE-FR.

Le tabelle 6.6, 6.7 e 6.8, mostrano le distanze massime e le attenuazioni massime ammesse per le diverse categorie di fibre ottiche multimodali in base alla velocità trasmissiva. Si noti come all’aumentare della velocità scenda notevolmente l’attenuazione massima ammessa sul canale trasmissivo che collega due apparati di rete o stazioni.

Per compensare vari fenomeni ottici che impattano negativamente sul tasso di errore quando si utilizzano le fibre ottiche multimodali a velocità elevate, al componente ricevitore viene inviato un segnale ottico di potenza maggiore, rispetto alle velocità inferiori, che compensa questi fenomeni negativi e mantiene il bit error rate (BER) entro i limiti di 10^{-12} . Il valore in termini di potenza ottica, che viene sottratto alla differenza in dB tra il segnale del trasmettitore e quello che ci si aspetta dal lato ricevitore, per avere una comunicazione con basso tasso di errore, prende il nome di *Penalty*. Il risultato di questa sottrazione fornisce il dato di *Insertion Loss* che corrisponde valore di attenuazione massimo ammesso sul canale trasmissivo.

Gli standard 25GBASE-SR4, 40GBASE-SR4, 50GBASE-SR e 200GBASE-SR4, impiegano il connettore MPO-12 che dispone di 12 fibre ottiche parallele (figura 6.22) che è di fatto una modularità standard molto presente nei cablaggi dei Data Center, mentre lo standard 400GBASE-SR16 impiega il connettore MPO-32 che dispone di 32 fibre ottiche parallele (figura 6.23).

Cablaggio fibra ottica MM 62,5/125 μm OM1				
Ethernet	100BASE-FX	1000BASE-SX	1000BASE-LX	10GBASE-SR
Distanza	2 m – 2000 m	2 m – 275 m	2 m – 550 m	2 m – 33 m
Attenuazione di canale massima	11 dB (a 1300 nm)	2,60 dB (a 850 nm)	2,35 dB (a 1300 nm)	1,6 dB (a 850 nm)

Cablaggio fibra ottica MM 50/125 μm OM2				
Ethernet	100BASE-FX	1000BASE-SX	1000BASE-LX	10GBASE-SR
Distanza	2 m – 2000 m	2 m – 550 m	2 m – 550 m	2 m – 82 m
Attenuazione di canale massima	6 dB (a 1300 nm)	3,56 dB (a 850 nm)	2,35 dB (a 1300 nm)	1,8 dB (a 850 nm)

Cablaggio fibra ottica MM 50/125 μm OM3				
Ethernet	100BASE-FX	1000BASE-SX	1000BASE-LX	10GBASE-SR
Distanza	2 m – 2000 m	2 m – 550 m	2 m – 550 m	2 m – 300 m
Attenuazione di canale massima	6 dB (a 1300 nm)	3,56 dB (a 850 nm)	2,35 dB (a 1300 nm)	2,6 dB (a 850 nm)

Tab. 6.6 – Impiego di fibre ottiche MM in Ethernet fino a 10 Gb/s

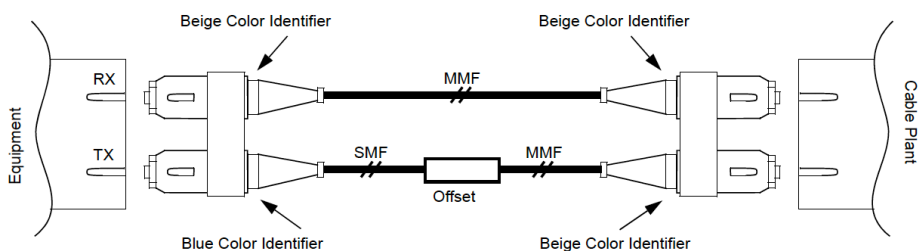


Fig. 6.21 – Mode Conditioning Patch Cord

25GBASE-SR4, 40GBASE-SR4, 50GBASE-SR			
Tipo di Fibra	OM3	OM4	OM5
Distanza	0,5 m – 70 m	0,5 m – 100 m	0,5 m – 100 m
Attenuazione di canale massima	1,8 dB (a 850 nm)	1,9 dB (a 850 nm).	1,9 dB (a 850 nm)

Tab. 6.7 – Impiego di fibre ottiche MM in Ethernet da 25 Gb/s a 50 Gb/s

100GBASE-SR4, 200GBASE-SR4, 400GBASE-SR16			
Tipo di Fibra	OM3	OM4	OM5
Distanza	0,5 m – 70 m	0,5 m – 100 m	0,5 m – 100 m
Attenuazione di canale massima	1,8 dB (a 850 nm)	1,9 dB (a 850 nm).	1,9 dB (a 850 nm)

Tab. 6.8 – Impiego di fibre ottiche MM in Ethernet da 100 Gb/s a 400 Gb/s

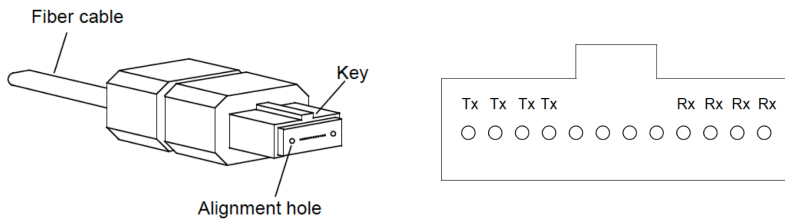


Fig. 6.22 – Connettore MPO-12 pin assignment

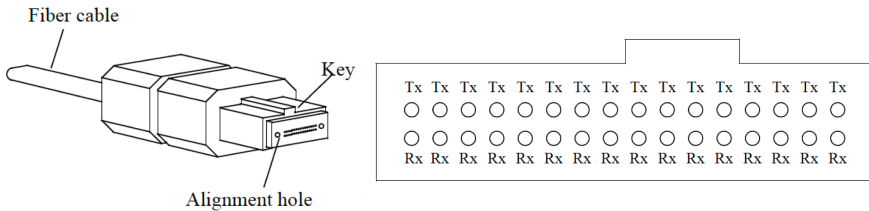


Fig. 6.23 – Connettore MPO-32 pin assignment

Gli standard per fibra ottica multimodale che vanno da 25 a 200 Gb/s utilizzano il cablaggio di tipo parallelo (si veda il capitolo 4), che è attualmente

basato sulla modularità 12 con maggior impiego di connettori MPO-12 e minor impiego di MPO-24. Quest'ultimo connettore veniva usato in una prima versione per le connessioni in fibra ottica multimodale a 100 Gb/s, con uno standard ormai abbandonato denominato 100GBASE-SR10 che utilizzava 10 fibre per trasmettere e 10 fibre per ricevere. L'abbandono di questo vecchio standard, in favore di 100GBASE-SR4, è principalmente giustificato da due fattori: il minor costo, perché utilizza solo 8 fibre, e la maggiore affidabilità di accoppiamento ottico.

L'ultimo numero in fondo all'acronimo degli standard che utilizzano il cablaggio parallelo basato su MPO indica quante fibre ottiche vengono utilizzate ai fini trasmissivi per ognuno dei due versi (TX e RX).

Più è elevato il numero di fibre parallele su un unico connettore MPO, più diventa critico l'allineamento delle fibre ottiche nell'accoppiamento tra il connettore maschio (quello con i pin di allineamento) e il connettore femmina (quello con i fori di allineamento). Va inoltre considerato che questi standard con velocità comprese tra 25 e 400 Gb/s richiedono un cablaggio perfetto, perché l'intero canale trasmissivo non deve superare l'attenuazione di 1,9 dB. Basti pensare che un minimo di sporcizia sulla superficie del connettore può aumentare l'attenuazione di 0,5 dB per capire come questo tipo di connessioni siano critiche. In teoria, ogni qual volta che si collega un apparato di rete con connessioni MPO, bisognerebbe effettuare la pulizia dei connettori tramite degli appositi kit.

Cisco produce un transceiver particolare per fibra ottica multimodale 40/100 Gb/s denominato "40/100Gb QSFP100 BiDi" (BiDi sta ad indicare Bidirectional), che rispecchia le specifiche standard dal punto di vista dell'attenuazione massima ammessa sul canale trasmissivo, ma a differenza delle specifiche 40GBASE-SR4 e 100GBASE-SR4 trasmette e riceve su due sole fibre ottiche in modalità bidirezionale usando due diverse lunghezze d'onda (figura 6.24). Questo transceiver può operare a 40 o 100 Gb/s ed è retrocompatibile con un precedente prodotto di tipo BiDi della Cisco che operava solo a 40 Gb/s.

Citiamo questa soluzione perché, sebbene sia proprietaria della Cisco, presenta diversi vantaggi rispetto alle soluzioni standard basate su connettore MPO ed utilizzanti 8 fibre ottiche in quanto:

- ha un costo inferiore rispetto alle soluzioni basate su MPO, perché usa solo 2 fibre;
- usa il connettore LC Duplex che è più affidabile di quello MPO;
- è una soluzione più pratica e flessibile in termini di cablaggio.

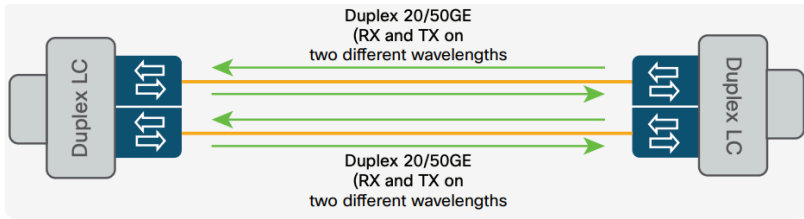


Fig. 6.24 – Transceiver Cisco Dual Rate 40/100 BiDi

Sulle connessioni in fibra ottica multimodale, a partire dallo standard a 10 Gb/s fino a 400 GB/s, diventa praticamente proibitivo l'impiego di tap passivi per ragioni di monitoraggio. Il tap passivo è di fatto uno splitter ottico basato sul principio dello specchio, dove il segnale ottico viene normalmente suddiviso equamente su due uscite (50/50). Questi tap inseriscono un'attenuazione tipica sulla connessione ottica compresa tra 3,5 e 3,8 dB. In certi casi le tolleranze dei transceiver permettono, pur con un maggiore tasso di errore, la connessione degli apparati, ma è sufficiente nel tempo un piccolo degrado dei componenti o una non perfetta pulizia delle superfici per interrompere la connessione o, peggio ancora, per provocare delle micro interruzioni che per la loro stessa natura sono difficili da diagnosticare. I tap con percentuali 60/40 o 70/30 di suddivisione del segnale ottico non risolvono il problema.

La figura 6.25 mostra lo schema di collegamento di un tap.

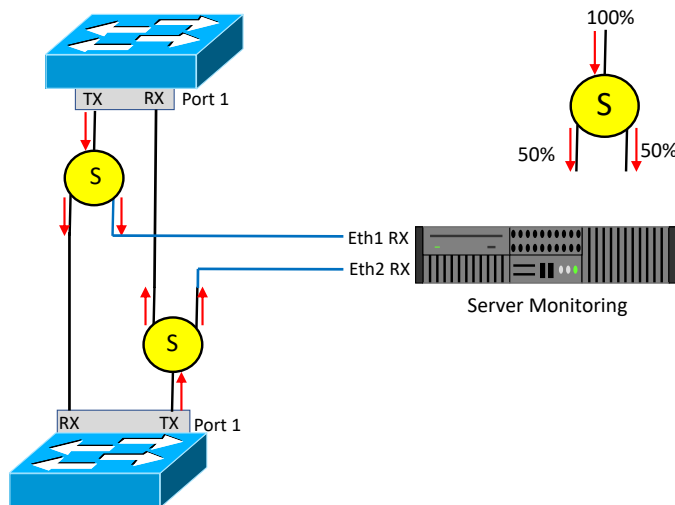


Fig. 6.25 – Schema di collegamento di un tap passivo

Gli standard basati sulle fibre ottiche monomodali sono sicuramente più adeguati a supportare le velocità molto elevate, perché l'attenuazione di canale massima ammessa è più elevata rispetto a quella delle fibre ottiche multimodali, non si usano connettori di tipo MPO, ma di tipo SC o LC Duplex che sono molto più affidabili. Per contro, il costo del transceiver monomodale è più elevato e, sebbene questo divario negli ultimi anni si sia ridotto, è comunque ancora circa 3 volte superiore a quello multimodale. Ma se da un lato si spende di più per il transceiver, si spende circa 4 volte di meno per il cablaggio (8 fibre necessarie su 25/40/50GBASE-SR e 2 sole fibre per 25/40/50GBASE-LR).

Fatta eccezione per lo standard 10GBASE-LR tutti gli altri per le velocità superiori trasmettono su più lunghezze d'onda sulla medesima fibra con la tecnica WDM (figura 6.26).

Le tabelle 6.9 e 6.10 mostrano le distanze e le attenuazioni massime ammesse per le fibre ottiche monomodali in base alla velocità trasmissiva.

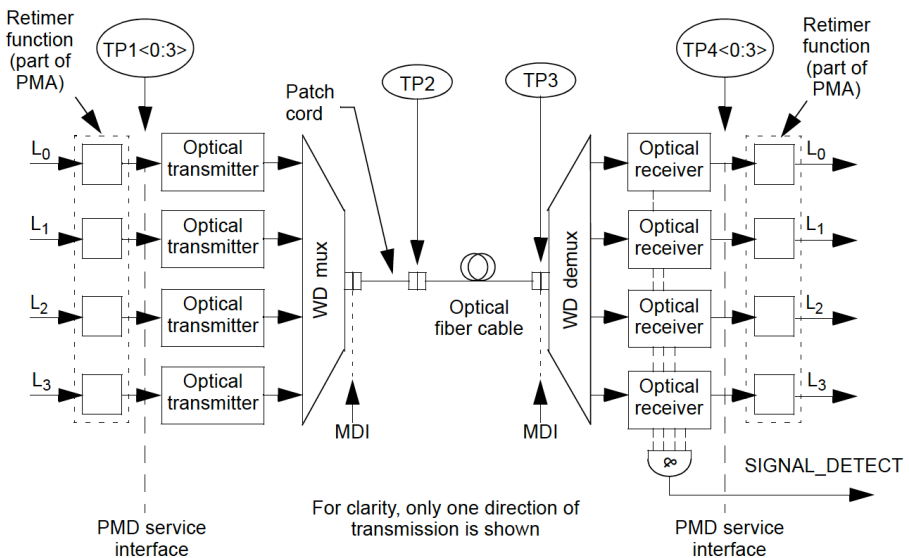


Fig. 6.26 – WDM su 4 lane

Cablaggio fibra ottica monomodale						
Ethernet	1000BASE-LX		10GBASE-LR		10GBASE-ER	
Distanza	2 m – 5 Km		2 m – 10 Km		2 m – 40 Km	
Tipo di fibra	OS1 o OS2		OS1 o OS2		OS2	
Attenuazione di canale	min.	max.	min.	max.	min.	max.
	4,57 dB		6,2 dB		5 dB	11 dB
	(a 1310 nm)		(a 1310 nm)		(a 1550 nm)	

Tab. 6.9 – Impiego di fibre ottiche SM fino a 10 Gb/s

Cablaggio fibra ottica monomodale OS2			
Standard Ethernet	Attenuazione fibra		Distanza
	min	max	
25GBASE-LR	/		2 m – 10 Km
25GBASE-ER	10 dB	18 dB	2 m – 40 Km
	10 dB	15 dB	2 m – 30 Km
40GBASE-FR	/		2 m – 2 Km
40GBASE-LR4	/		2 m – 10 Km
40GBASE-ER4	9 dB	18,5 dB	2 m – 40 Km
	9 dB	16,5 dB	2 m – 30 Km
50GBASE-FR	/		2 m – 2 Km
50GBASE-LR	/		2 m – 10 Km
100GBASE-LR4	/		2 m – 10 Km
100GBASE-ER4	/		2 m – 40 Km
	/		2 m – 30 Km
200GBASE-DR	/		2 m – 500 m
200GBASE-LR4	/		2 m – 10 Km
400GBASE-DR	/		2 m – 500 m
400GBASE-FR8	/		2 m – 2 Km
400GBASE-LR8	/		2 m – 10 Km

Tab. 6.10 – Impiego di fibre ottiche SM da 25 Gb/s a 400 Gb/s

Il maggior valore di attenuazione massima ammesso (Link Loss) a disposizione del cablaggio in fibra ottica monomodale, oltre a rendere la connessione più gestibile e affidabile, è di fatto l'unica soluzione accettabile per l'eventuale inserimento di tap passivi. Infatti, il canale trasmissivo con la fibra ottica monomodale, nella maggior parte dei casi, ammette un'attenuazione massima di canale superiore a 6 dB e, anche nel caso di impiego di standard di ridotta potenza ottica, il valore di 4 dB può essere sufficiente per l'inserimento di un tap passivo 50/50, in quanto ha un'attenuazione massima di 3,8 dB.

Osservando le tabelle 6.9 e 6.10 si noti che alcuni standard richiedono un valore minimo di attenuazione del canale trasmissivo e, se il canale trasmissivo avesse un valore inferiore al minimo richiesto, è necessario inserire un attenuatore per ottenere un'attenuazione di canale compresa tra i valori minimo e massimo. L'attenuatore va inserito lato ricevitore per evitare le riflessioni di segnale ottico (figura 6.27).

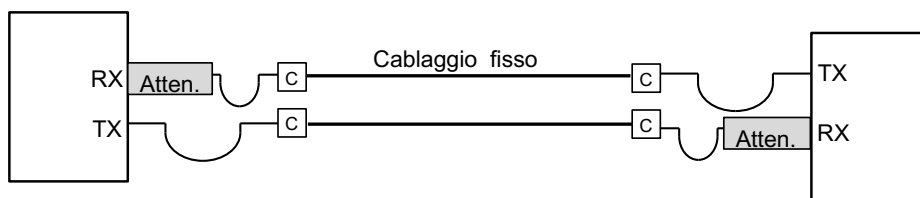


Fig. 6.27 – Attenuatori su connessione monomodale

6.9 L'AUTONEGOZIAZIONE DEI PARAMETRI DI LIVELLO FISICO

Lo standard 802.3 nelle connessioni basate su doppino prevede dei criteri per negoziare la velocità trasmissiva e le due diverse modalità trasmissive Half e Full Duplex. L'obiettivo della funzione di auto-negoziatura è quello di negoziare prioritariamente la modalità che offre il massimo delle prestazioni possibili.

In modalità Full Duplex è possibile trasmettere e ricevere contemporaneamente con il conseguente raddoppio delle prestazioni sulla connessione rispetto alla modalità Half Duplex (tabella 6.11).

Standard	Half Duplex	Full Duplex
10BaseT	10 Mb/s	20 Mb/s
100BASE-TX	100 Mb/s	200 Mb/s
1000BASE-T	1000 Mb/s	2000 Mb/s
2.5GBASE-T	N.A.	5 Gb/s
5GBASE-T	N.A.	10 Gb/s
10GBASE-T	N.A.	20 Gb/s
40GBASE-T	N.A.	80 Gb/s

Tab. 6.11 – Prestazioni massime su connessioni Half e Full Duplex

La priorità di negoziazione è la seguente e come si può notare privilegia le prestazioni maggiori:

1. 40GBASE-T Full Duplex
2. 25GBASE-T Full Duplex
3. 10GBASE-T Full Duplex
4. 5GBASE-T Full Duplex
5. 2.5GBASE-T Full Duplex
6. 1000BASE-T Full Duplex
7. 1000BASE-T Half Duplex
8. 100BASE-TX Full Duplex
9. 100BASE-TX Half Duplex
10. 10BaseT Full Duplex
11. 10BaseT Half Duplex

Si noti come a partire dalla velocità dello standard 2.5GBASE-T fino alle velocità superiori non c'è più la negoziazione della modalità Half Duplex, perché questi standard sono stati progettati per operare solo su reti switched.

Al contrario, fino allo standard 1000BASE-T era possibile operare in modalità condivisa secondo il MAC CSMA/CD, sebbene non sia a conoscenza di ripetitori per il Gigabit Ethernet. Lo standard 1000BASE-T è stato utilizzato solo per realizzazione di interfacce di rete e di switch, ma non di ripetitori. Ciò nonostante le porte 1000BASE-T potrebbero operare sia in modalità Full Duplex,

sia Half Duplex, sebbene quest'ultima non abbia alcun senso di essere utilizzata in quanto non esistono dei ripetitori che operano a questa velocità.

Lo standard 802.3 definisce i due apparati posti alle due estremità di una connessione con il termine “*Partner*” in quanto devono concordare come operare a livello fisico. La negoziazione dei parametri di livello fisico si può suddividere in due fasi:

- Fase 1: i due Partner comunicano le loro possibili caratteristiche trasmissive denominate “ability”;
- Fase 2: i due Partner impostano i parametri trasmissivi più performanti comuni ad entrambi secondo il criterio della priorità di negoziazione.

Nell'esempio illustrato nella figura 6.28 i due partner hanno negoziato la modalità 100BASE-TX Full Duplex perché prioritaria e comune ad entrambi.

L'autonegoziazione è di default abilitata, ma può essere disabilitata.

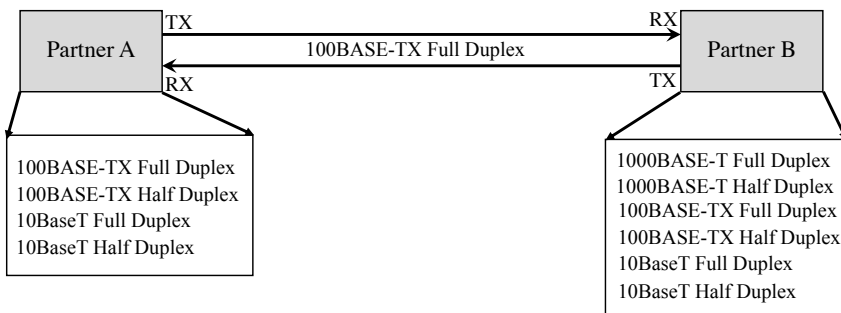


Fig. 6.28 – Esempio di negoziazione

Le prime specifiche inerenti l'autonegoziazione dei parametri fisici vennero definite alla fine degli anni '90, quando c'era ancora una presenza significativa di reti shared dove il mezzo trasmissivo era condiviso e, per le connessioni point-to-point, si usavano ancora i ripetitori multiporta denominati hub. Mentre le porte degli switch possono operare in entrambe le modalità Full o Half Duplex, i ripetitori multiporta possono operare solo in modalità Half Duplex, inoltre, sono completamente trasparenti al livello 2 della pila OSI in quanto ripetono dei bit a livello fisico. Per questa ragione, lo standard non poteva definire una sorta di protocollo di servizio al livello 2 per scambiare i parametri fisici in quanto sarebbe stato trasparente ai ripetitori multiporta che l'avrebbero fatto transitare senza poter interagire. Il comitato 802.3 decise, quindi, in un primo tempo, di scambiare le informazioni di negoziazione tramite una sequenza codificata di impulsi a livello

fisico denominata Normal Link Pulse (NLP) per lo standard 10BaseT, che venne successivamente sostituita con il Fast Link Pulse (FLP) il quale è retrocompatibile con NLP.

Gli impulsi FLP hanno una durata di 100 ns e possono essere di tipo *Clock* o *Data*. La distanza tipica tra due impulsi Clock è di 125 μ s, se in mezzo a questi c'è un impulso Data, che dista circa 62,5 μ s da entrambi, questo viene codificato come bit di valore "1", se invece è assente viene codificato come bit di valore "0" (figura 6.29).

La sequenza prorompente di impulsi denominata "*burst*" viene inviata appena si stabilisce la connessione fisica tra i due partner. A seconda delle informazioni che devono essere scambiate i burst possono contenere 16 o 48 bit di dati informativi: D0, D1, D2, ecc. Questi vengono opportunamente codificati e salvati in appositi registri interni dell'interfaccia di rete, i quali contengono le informazioni delle pagine di dati relativi alla negoziazione dei parametri di rete (figure 6.30, 6.31, 6.32). Le pagine possono a loro volta contenere 16 o 48 bit di informazioni nel caso della codifica della pagina denominata "Extended Next Page".

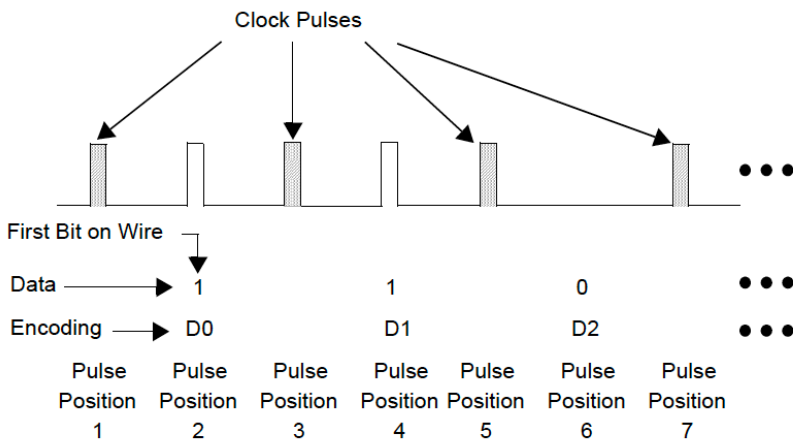


Fig. 6.29 – Bit di dati in un burst FLP

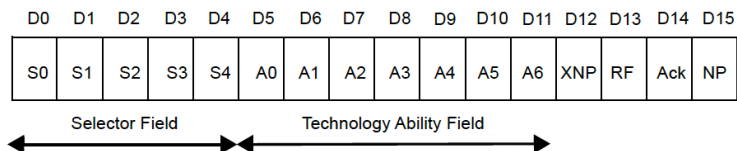


Fig. 6.30 – FLP: codifica dei bit di dati della prima pagina

S4	S3	S2	S1	S0	Selector description
0	0	0	0	0	Reserved for future Auto-Negotiation development
0	0	0	0	1	IEEE Std 802.3
0	0	0	1	0	IEEE Std 802.9a-1995 (withdrawn)
0	0	0	1	1	IEEE Std 802.5v-2001 (withdrawn)
0	0	1	0	0	IEEE Std 1394
0	0	1	0	1	INCITS
0	0	1	1	X	Reserved for future Auto-Negotiation development
0	1	X	X	X	Reserved for future Auto-Negotiation development
1	X	X	X	X	Reserved for future Auto-Negotiation development

Fig. 6.31 – Selector Field

Ogni pagina contiene 16 bit informativi, la prima pagina è suddivisa in due parti:

- Selector Field contiene il valore “00001” indicante lo standard 802.3 (figura 6.31);
- Technology Ability Field contiene le informazioni per le velocità comprese tra 10 e 100 Mb/s (figura 6.32), si noti che viene anche riportato lo standard 100BASE-T4 che non ha avuto successo ed è praticamente sconosciuto;
- Il bit “NP” se ha il valore “1” sta ad indicare che è presente un’altra pagina di dati.

Bit	Technology	Minimum cabling requirement
A0	10BASE-T	Two-pair Category 3
A1	10BASE-T full duplex	Two-pair Category 3
A2	100BASE-TX	Two-pair Category 5
A3	100BASE-TX full duplex	Two-pair Category 5
A4	100BASE-T4	Four-pair Category 3
A5	PAUSE operation for full duplex links	Not applicable
A6	Asymmetric PAUSE operation for full duplex Links	Not applicable

Fig. 6.32 – Technology Ability Field

Le informazioni relative alle velocità Gigabit e Multi-Gigabit vengono codificate in successive pagine. Se la pagina successiva contiene il valore “1” nel campo “MP” (bit D13) viene codificata come Message Page (figura 6.33), mentre se contiene il valore “0” la pagina viene codificata come Unformatted Page secondo (figura 6.34).

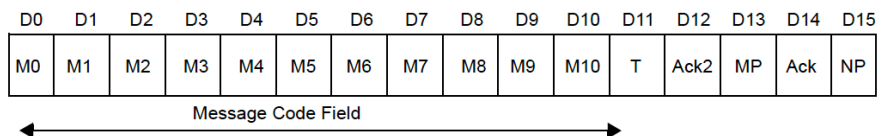


Fig. 6.33 – Message Page

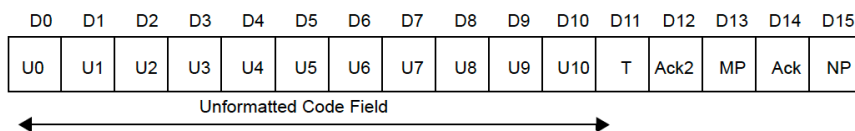


Fig. 6.34 – Unformatted Page

Qualora le informazioni da codificare siano molte vengono utilizzate le pagine da 48 bit di informazioni che possono essere di tipo:

- Extended Message Next Page (figura 6.35);
- Extended Unformatted Next Page (figura 6.36).

I parametri relativi alle velocità di 1 o più Gigabit vengono codificati nella pagina Extended Message Next Page (figura 6.35) nel seguente modo:

- Bit U14: 1000BASE-T full duplex (1 = full duplex and 0 = no full duplex);
- Bit U15: 1000BASE-T half duplex (1 = half duplex and 0 = no half duplex);
- Bit U28: 2.5GBASE-T ability (1 = support of 2.5GBASE-T and 0 = no support);
- Bit U27: 5GBASE-T ability (1 = support of 5GBASE-T and 0 = no support);
- Bit U16: 10GBASE-T ability (1 = support of 10GBASE-T and 0 = no support);
- Bit U25: 25GBASE-T ability (1 = support of 25GBASE-T and 0 = no support);
- Bit U26: 40GBASE-T ability (1 = support of 40GBASE-T and 0 = no support).

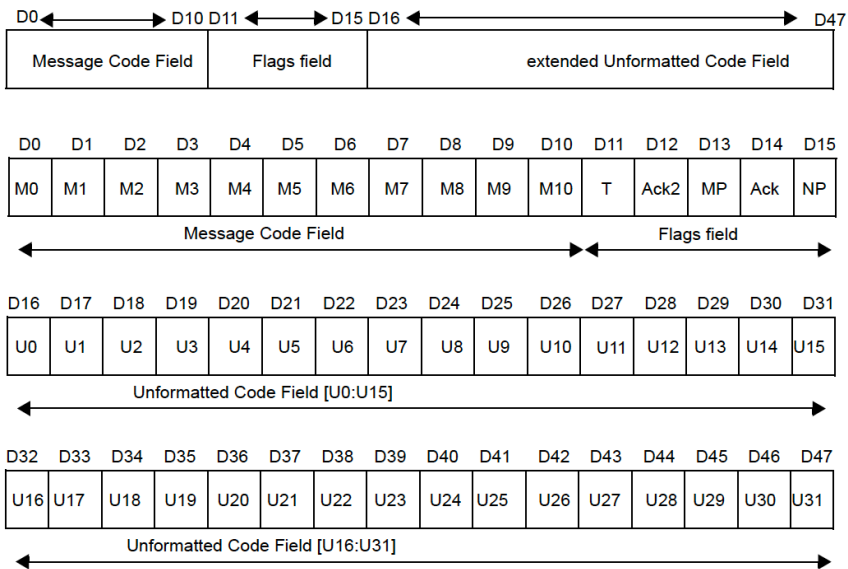


Fig. 6.35 – Extended Message Next Page

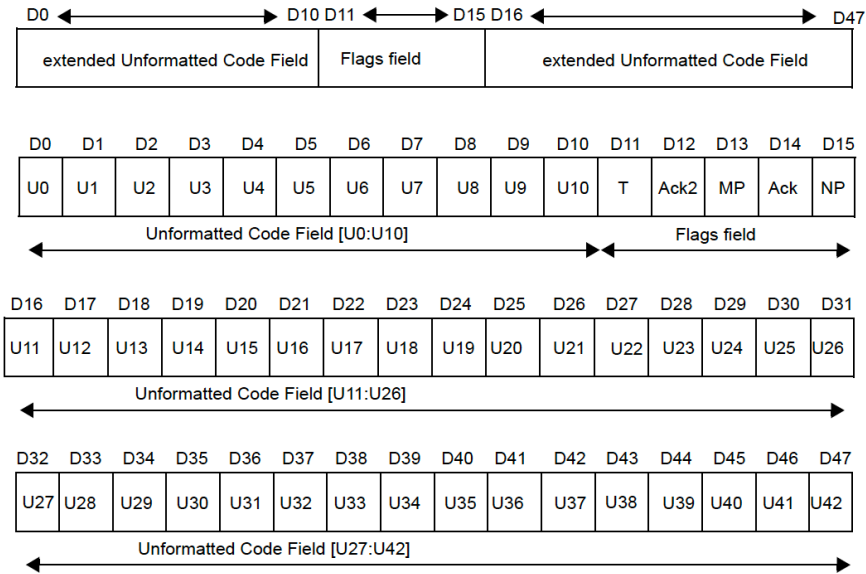


Fig. 6.36 – Extended Unformatted Next Page

6.9.1 Problemi di autonegoiazione

L'autonegoiazione non è obbligatoria, sebbene sia un'impostazione di default, essa può essere pertanto disabilitata e si può configurare manualmente sia la velocità trasmissiva, sia la modalità operativa Full o Half Duplex.

In un primo caso i problemi si verificano quando l'interfaccia ad un'estremità viene configurata in modalità Full Duplex e, all'estremità opposta, l'altra interfaccia è in modalità autonegoiazione. In tal caso, quest'ultima, appena viene stabilita la connessione fisica, invia i burst FLP per negoziare i parametri di livello fisico e, se non riceve risposta, si comporta come se fosse connessa fisicamente ad un ripetitore. Quindi, imposta la modalità Half Duplex e genera un numero elevato di false collisioni, che compromettono l'efficienza della trasmissione e possono anche causare l'aborto delle ritrasmissioni di diversi pacchetti, con impatti drammatici sulla connessione.

Un altro caso di configurazione errata si ha quando l'interfaccia ad un'estremità viene configurata in modalità Full Duplex e, all'estremità opposta, viene configurata in modalità Half Duplex.

Ci sono casi piuttosto rari in cui sebbene entrambe le interfacce di rete poste all'estremità di una connessione siano configurate in modalità autonegoiazione,

questa non funzioni correttamente per piccole incompatibilità hardware ed una delle due interfacce imposti la modalità Full Duplex, mentre l'altra imposta quella Half Duplex, in tal caso l'unica soluzione è configurare entrambe in modalità Full Duplex fisso.

6.10 POWER OVER ETHERNET (PoE)

Quando all'inizio degli 2000 incominciò ad affermarsi la tecnologia VoIP, nacque la necessità di telealimentare i telefoni per evitare di utilizzare alimentatori esterni, quindi il comitato che si occupa di Ethernet sviluppò un primo standard denominato 802.3af. Questo standard inietta un'alimentazione in corrente continua su due coppie del doppino in grado di fornire una potenza massima di 15,4 W e viene denominato PoE (Power over Ethernet).

Ben presto si scopri l'utilità e la praticità d'impiego del PoE e il suo utilizzo venne esteso alla connessione di Access Point Wi-Fi, Webcam e, più in generale, di un numero sempre maggiore di apparati di vario genere che utilizzano Ethernet per inviare informazioni di controllo e gestione nell'accezione attuale del termine IoT (Internet of Things).

Lo standard 802.3af prevede due tipologie di sorgenti di alimentazione denominate PSE (Power Sourcing Equipment) e Midspan PSE, che corrisponde alla porta di quell'apparato denominato commercialmente PoE Injector, il quale viene interposto tra lo switch che non dispone di porte PoE e l'apparato da alimentare (figure 6.37 e 6.38).

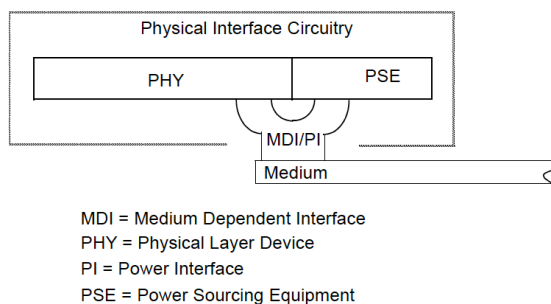


Fig. 6.37 – Power Sourcing Equipment (PSE)

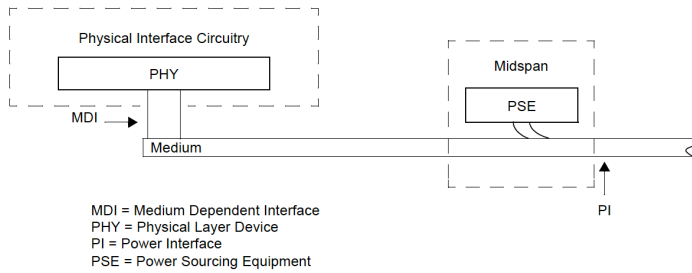


Fig. 6.38 – Midspan PSE

Una connessione PoE è formata da una porta PSE, tipicamente quella di uno switch (figura 6.39), e una porta PD (Powered Device) o, in alternativa, una porta Midspan PSE (quella di un PoE Injector) e una porta PD.

Il PoE Injector viene impiegato quando lo switch non dispone di porte PoE ed è corredato di un alimentatore esterno e due porte RJ45, una LAN e una PoE (figura 6.40).



Fig. 6.39 – Schema di collegamento PSE e PD

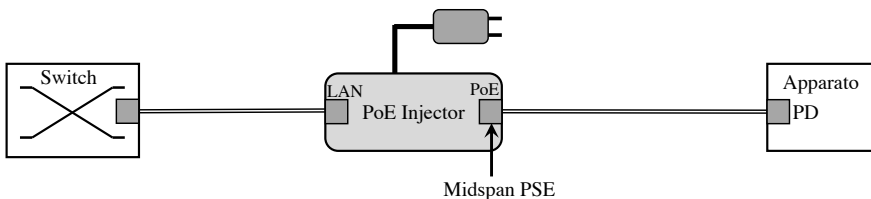


Fig. 6.40 – Schema di collegamento del PoE Injector

Le prime versioni dello standard PoE utilizzano due coppie in cui iniettare l'alimentazione a prescindere che gli standard di livello fisico delle varie velocità utilizzino 2 o 4 coppie. Ci saranno pertanto diversi schemi di collegamento con due alternative:

- L'alternativa denominata "A" utilizza le coppie che terminano nei contatti 1-2 e 3-6;
- L'alternativa denominata "B" utilizza le coppie che terminano nei contatti 4-7 e 7-8.

Gli schemi di collegamento sono i seguenti:

- Connessione PSE - PD per gli standard 10BaseT e 100BASE-TX (figura 6.41);
- Connessione PSE - PD per gli standard Gigabit e Multi Gigabit (figura 6.42);
- Connessione Midspan PSE - PD per gli standard 10BaseT e 100BASE-TX (figura 6.43);
- Connessione Midspan PSE - PD per gli standard Gigabit e Multi Gigabit (figura 6.44).

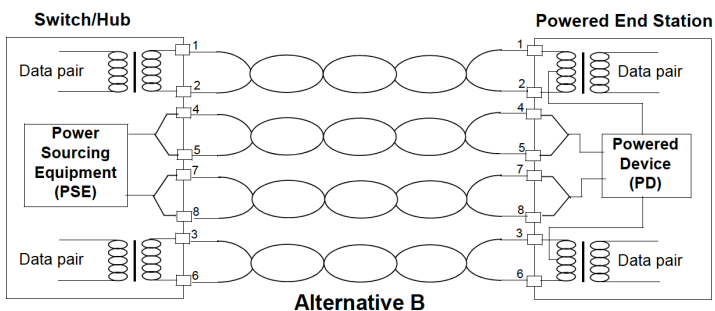
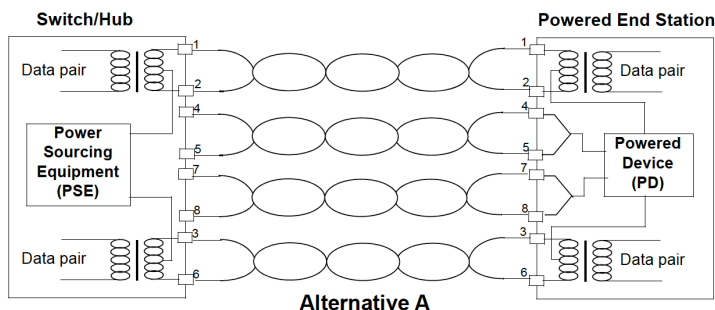


Fig. 6.41 – Schemi collegamento PSE – PD 10BaseT e 100BASE-TX

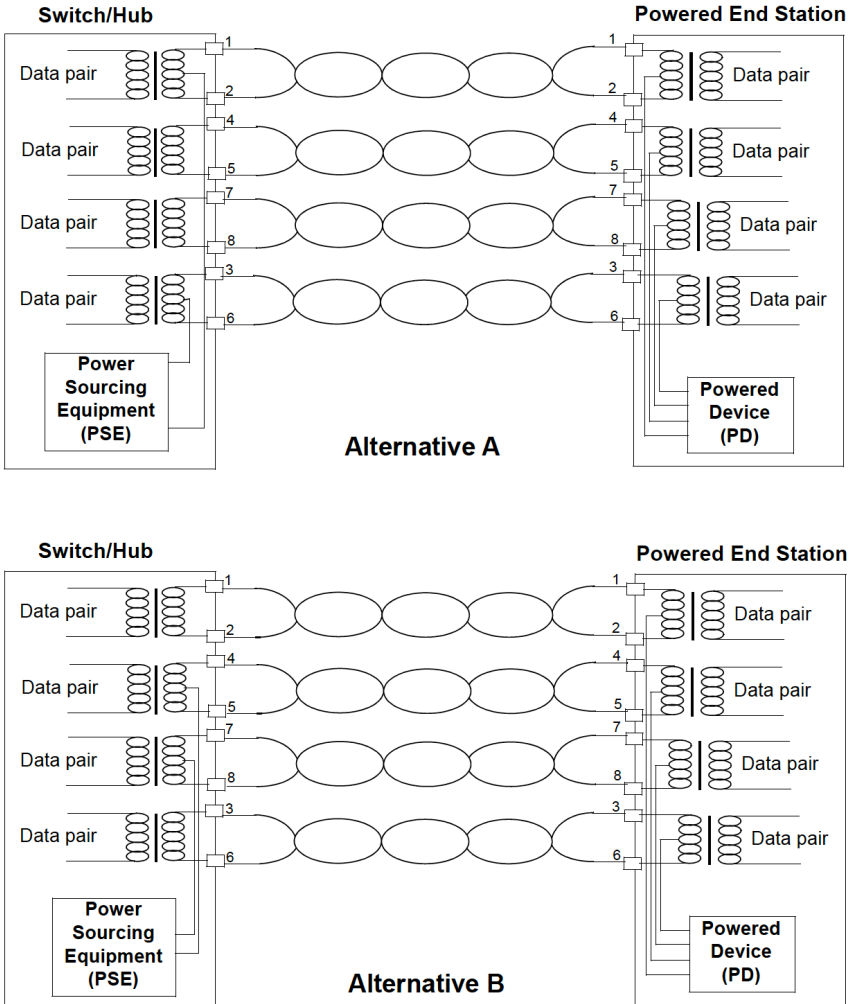


Fig. 6.42 – Schemi collegamento PSE – PD Gigabit e Multi Gigabit

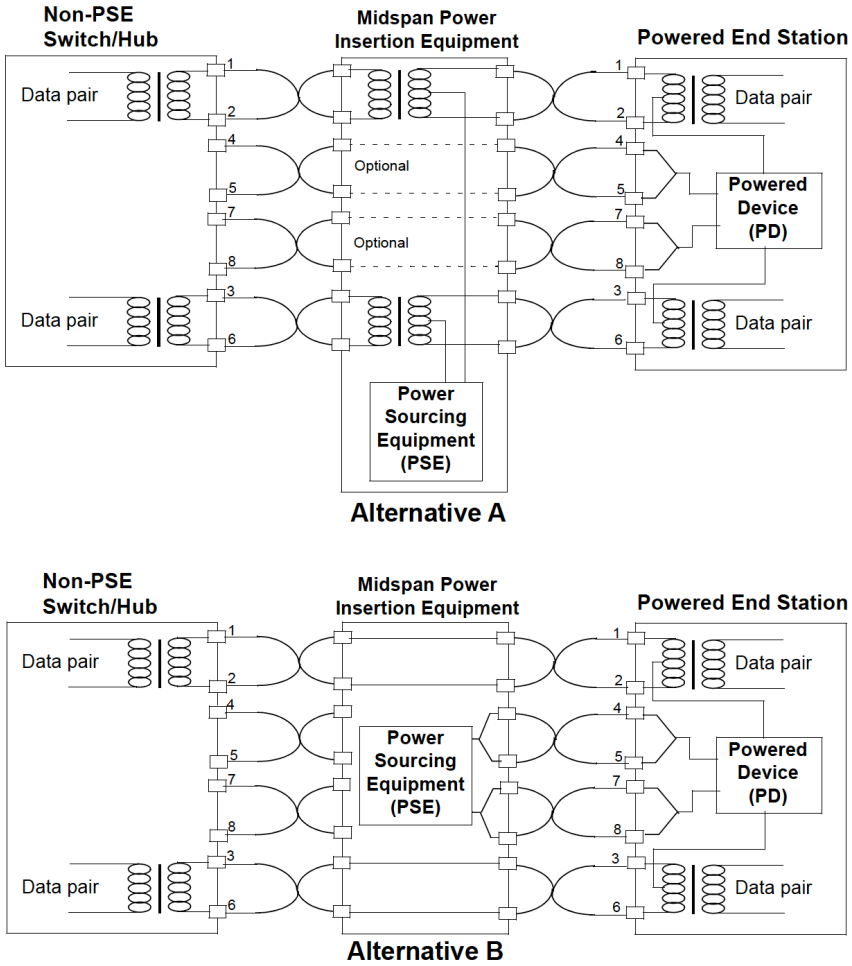


Fig. 6.43 – Schemi collegamento Midspan PSE – PD 10BaseT e 100BASE-TX

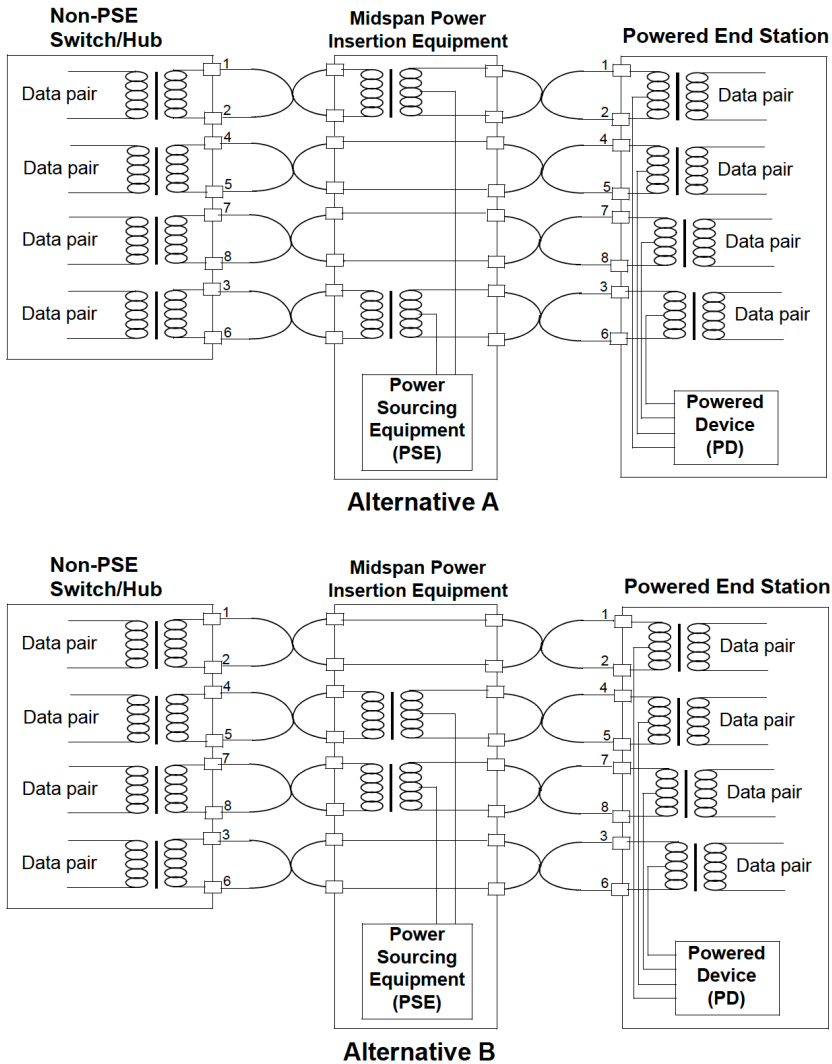


Fig. 6.44 – Schemi collegamento Midspan PSE – PD Gigabit e Multi Gigabit

A seguito della necessità di una maggiore potenza disponibile, per l'apparato da telealimentare, è stato sviluppato lo standard 802.3at che può fornire una potenza massima di 34,2 W; questo tipo di PoE è stato definito di Tipo 2, mentre quello del primo standard 802.3af è stato definito di Tipo 1.

La tabella 6.12 mostra le differenze di potenza tra gli standard 802.3af e 802.3at.

Specifiche	PoE 802.3af Tipo 1	PoE 802.3at Tipo 2
Potenza massima lato PSE	15,4 W	34,2 W
Potenza garantita lato PD	12,95 W	25,5 W
Massima perdita di potenza sul cavo	2,95 W	8,7 W
Range di Voltaggio lato PSE	min. 44 V – max. 57 V	min. 50 V – max. 57 V
Range di Voltaggio lato PD	min. 37 V – max. 57 V	min. 42,5 V – max. 57 V
Corrente massima	350 mA	600 mA

Tab. 6.12 – Caratteristiche principali degli standard 802.3af e 802.3at

Verso la fine dell'anno 2018 è stato approvato lo standard 802.3bt che incrementa ulteriormente la potenza, ma a differenza dei precedenti standard la potenza viene iniettata su 4 coppie.

La corrente massima viene aumentata al valore di 1,73 A ed è distribuita sulle 4 coppie, la potenza massima lato PSE è di 90 W (tabella 6.13).

Specifiche	PoE 802.3bt
Potenza massima lato PSE	90 W
Potenza garantita lato PD	71,3 W
Massima perdita di potenza sul cavo	18,7 W
Corrente massima	1,73 A

Tab. 6.13 – Caratteristiche principali dello standard 802.3bt

Gli schemi di collegamento dello standard 802.3bt sono i seguenti:

- Connessione PSE - PD per gli standard 10BaseT e 100BASE-TX (figura 6.45);
- Connessione PSE - PD per gli standard Gigabit e Multi Gigabit (figura 6.46);
- Connessione Midspan PSE - PD per gli standard 10BaseT e 100BASE-TX (figura 6.47);

- Connessione Midspan PSE - PD per gli standard Gigabit e Multi Gigabit (figura 6.48).

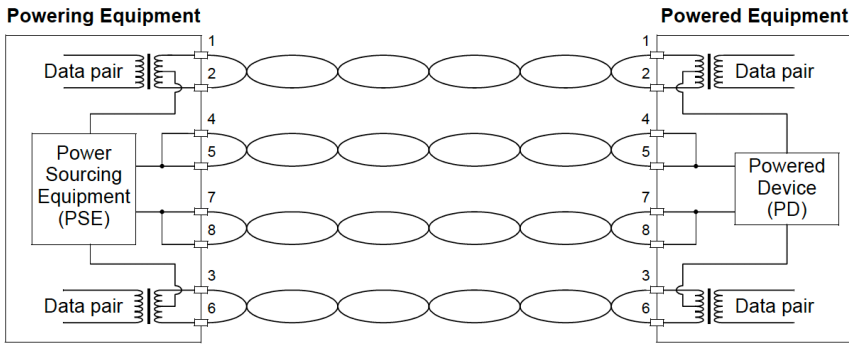


Fig. 6.45 – PSE – PD 10BaseT e 100BASE-TX

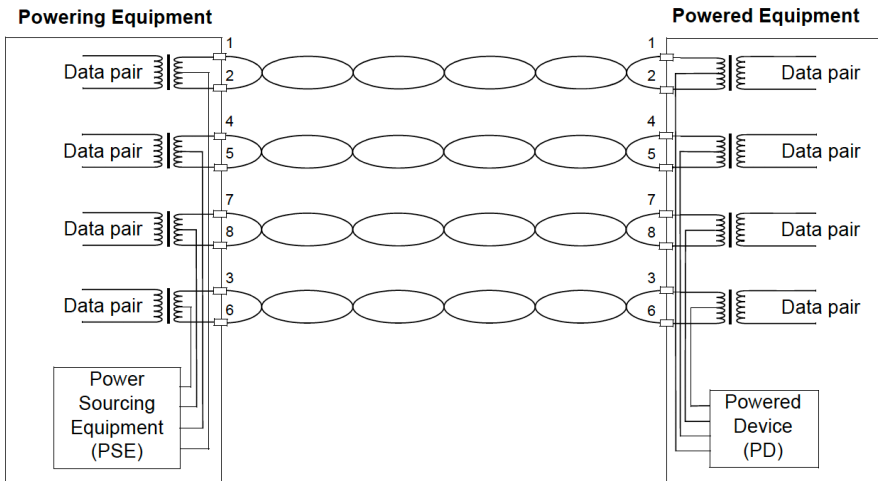


Fig. 6.46 – PSE – PD Gigabit e Multi Gigabit

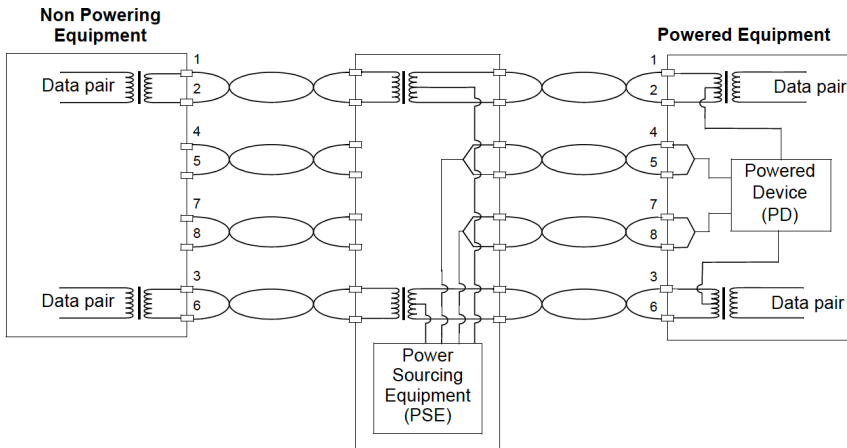


Fig. 6.47 – Midspan PSE – PD 10BaseT e 100BASE-TX

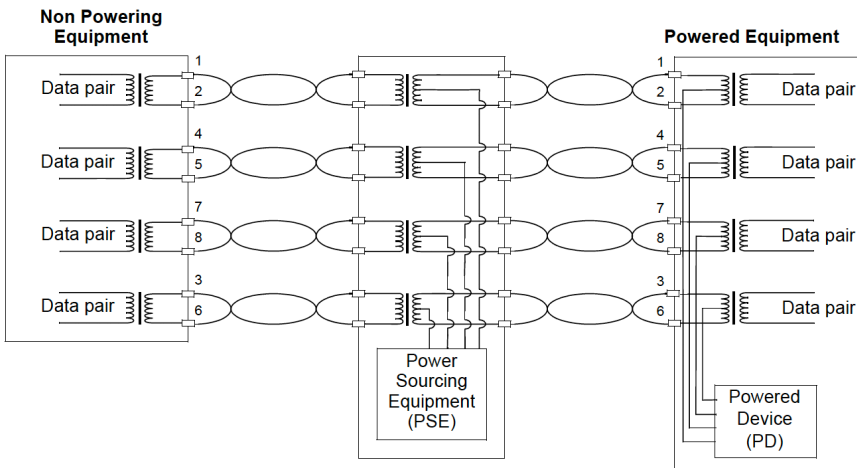


Fig. 6.48 – Midspan PSE – PD Gigabit e Multi Gigabit

Lo standard 802.3bt consiglia l'uso di cavi da 23 AWG per il cablaggio e di cavi patch da aventi una dimensione minima di 26 AWG per ridurre al minimo la perdita di potenza sui cavi, non sono pertanto raccomandati i cavi di patch da 28 AWG sebbene siano ammessi nelle ultime versioni degli standard di cablaggio TIA/EIA 568.

RINGRAZIAMENTI

Un particolare ringraziamento ad Alessio Durante (Ingegneria Informatica al Politecnico di Torino) per la correzione delle bozze.

NOTE DI REVISIONE E AGGIORNAMENTO

Questo capitolo è stato rivisto ed aggiornato il 4 Gennaio 2020.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "The Ethernet. A Local Area Network Data Link Layer and Physical Layer Specification," Version 2.0, November 1982, document no. AA-K759B-TK, Digital Equipment Corporation Maynard (MA), Intel Corporation Santa Clara (CA), Xerox Corporation Stamford (Ca).
- [2] IEEE Std 802.3™-2018.
- [3] IEEE Std 802.3cb™-2018 Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 2.5 Gb/s and 5 Gb/s Operation over Backplane.
- [4] IEEE Std 802.3bt™-2018 Amendment 2: Physical Layer and Management Parameters for Power over Ethernet over 4 Pairs.
- [5] IEEE Std 802.3cd™-2018 Amendment 3: Media Access Control Parameters for 50 Gb/s and Physical Layers and Management Parameters for 50 Gb/s, 100 Gb/s, and 200 Gb/s Operation

INDICE DEI PARAGRAFI

6.1	INTRODUZIONE	1
6.2	CENNI STORICI	3
6.3	METODO DI ACCESSO CSMA/CD	4
6.3.1	Caratteristiche funzionali	7
6.3.2	Collision domain	8
6.3.3	Problemi di rilevamento delle collisioni	9

6.4	ETHERNET VERSIONE 2.0.....	10
6.4.1	Formato del pacchetto Ethernet V 2.0.....	12
6.5	LO STANDARD IEEE 802.3/ISO 8802.3.....	12
6.5.1	Sottolivello MAC.....	13
6.6	CONVIVENZA DI ETHERNET E IEEE 802.3.....	16
6.7	VLAN Tagging.....	17
6.8	Il livello fisico e le evoluzioni.....	19
6.8.1	Repeater 802.3.....	19
6.8.2	Gli standard di livello fisico basati sul doppino.....	20
6.8.3	Gli standard di livello fisico basati sulla fibra ottica.....	26
6.9	L'autonegoziazione dei parametri di livello fisico.....	35
6.9.1	Problemi di autonegoziazione.....	42
6.10	Power Over Ethernet (PoE).....	43