

Industrial Ethernet

Caratteristiche e protocolli derivati

Presentazione di
Gian Paolo Incremona
Fabrizio Giandelli

Università degli Studi di Pavia
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica
Sistemi e Componenti per l'Automazione

10 Febbraio 2012



- 1 Ethernet
- 2 Industrial Ethernet
- 3 Protocolli derivati
- 4 Conclusioni
- 5 Riferimenti bibliografici

Ethernet

Ethernet è un protocollo di comunicazione basato, nella sua versione odierna, sullo standard **IEC 802.3**.

Si colloca ai primi due livelli del modello ISO/OSI, gli unici che dipendono dal tipo di mezzo utilizzato per comunicare:

- 1 *Livello fisico;*
- 2 *Livello di data link.*

Evoluzione dello standard

Anno	Tecnologia	Standard	Bit-rate
1967-1972	Rete radio e su cavo coassiale ALOHA	-	2, 94Mb/s
1973	Ethernet	Ethernet	-
1980	DIX.1	Ethernet I	-
1982	DIX.2	Ethernet II	10Mb/s
1985	10Base-5, 10Base-210B	802.3	10Mb/s
1987	Fiber Optic Inter Reapeter (FOIRL)	802.3d	10Mb/s
1990	10 Base-T	802.3i	10Mb/s
1993	10 Base-F	802.3j	10Mb/s
1995	10 Base-T4, 10 Base-TX, 10 Base-FX	802.3u	10Mb/s
1997	100Base-T2	802.3y	100Mb/s
1998	1000Base-SX, 1000Base-LX, 1000Base-CX	802.3z	1Gb/s
1999	1000Base-T	802.3ab	1Gb/s
2001	10Gbase-LX	802.3ae	10Gb/s
2004	10GBASE-CX4	802.3ak	10Gb/s
2006	10GBASE-T ,10GBASE-LRM	802.3an	10Gb/s
2010-2011	-	802.3ba	40Gb/s
2014	- Connettori rame 4 canali	802.3bj	100 Gb/s
2015	100G/40G Fibra ottica	802.3bm	100 Gb/s

Livello fisico

I supporti fisici utilizzati da Ethernet sono:

Cavo coassiale Supporta gli standard **10BASE-5 (Thick Ethernet)** e **10BASE-2 (Thin Ethernet)** ed era utilizzato per le diramazioni dipartimentali delle reti locali con velocità massima di $10 \frac{Mb}{s}$, comunicazione di tipo **half-duplex** e topologia a **bus seriale**.

Doppino intrecciato Utilizzato sia nella versione schermata che no (STP e UTP), permette di raggiungere velocità di $10 \frac{Gb}{s}$; la topologia di rete è a stella con un nodo di smistamento centrale (**hub**). La comunicazione è sia **half-duplex** che **full-duplex**. Il connettore dominante è di tipo **RJ45** a 8 pin, usato a due o a quattro terminali in base alla velocità e al tipo di comunicazione, provvisto eventualmente di gusci protettivi al calore e alle vibrazioni.

Fibra ottica Soluzione costosa ma in grado di coprire distanze fino a *2km*. Immune a interferenze di tipo elettrico tipiche di un ambiente industriale, supporta gli standard **FOIRL**, **10Base-F**, **Fast Ethernet**, **Gigabit Ethernet**. Le connessioni usano due fibre separate, una per trasmettere ed una per ricevere, con connettori di vario tipo.

Livello fisico

I supporti fisici utilizzati da Ethernet sono:

Cavo coassiale Supporta gli standard **10BASE-5 (Thick Ethernet)** e **10BASE-2 (Thin Ethernet)** ed era utilizzato per le diramazioni dipartimentali delle reti locali con velocità massima di $10 \frac{Mb}{s}$, comunicazione di tipo **half-duplex** e topologia a **bus seriale**.

Doppino intrecciato Utilizzato sia nella versione schermata che no (STP e UTP), permette di raggiungere velocità di $10 \frac{Gb}{s}$; la topologia di rete è a **stella** con un nodo di smistamento centrale (**hub**). La comunicazione è sia **half-duplex** che **full-duplex**. Il connettore dominante è di tipo **RJ45** a 8 pin, usato a due o a quattro terminali in base alla velocità e al tipo di comunicazione, provvisto eventualmente di gusci protettivi al calore e alle vibrazioni.

Fibra ottica Soluzione costosa ma in grado di coprire distanze fino a *2km*. Immune a interferenze di tipo elettrico tipiche di un ambiente industriale, supporta gli standard **FOIRL**, **10Base-F**, **Fast Ethernet**, **Gigabit Ethernet**. Le connessioni usano due fibre separate, una per trasmettere ed una per ricevere, con connettori di vario tipo.

Livello fisico

I supporti fisici utilizzati da Ethernet sono:

Cavo coassiale Supporta gli standard **10BASE-5 (Thick Ethernet)** e **10BASE-2 (Thin Ethernet)** ed era utilizzato per le diramazioni dipartimentali delle reti locali con velocità massima di $10 \frac{Mb}{s}$, comunicazione di tipo **half-duplex** e topologia a **bus seriale**.

Doppino intrecciato Utilizzato sia nella versione schermata che no (STP e UTP), permette di raggiungere velocità di $10 \frac{Gb}{s}$; la topologia di rete è a **stella** con un nodo di smistamento centrale (**hub**). La comunicazione è sia **half-duplex** che **full-duplex**. Il connettore dominante è di tipo **RJ45** a 8 pin, usato a due o a quattro terminali in base alla velocità e al tipo di comunicazione, provvisto eventualmente di gusci protettivi al calore e alle vibrazioni.

Fibra ottica Soluzione costosa ma in grado di coprire distanze fino a *2km*. Immune a interferenze di tipo elettrico tipiche di un ambiente industriale, supporta gli standard **FOIRL, 10Base-F, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet**. Le connessioni usano due fibre separate, una per trasmettere ed una per ricevere, con connettori di vario tipo.

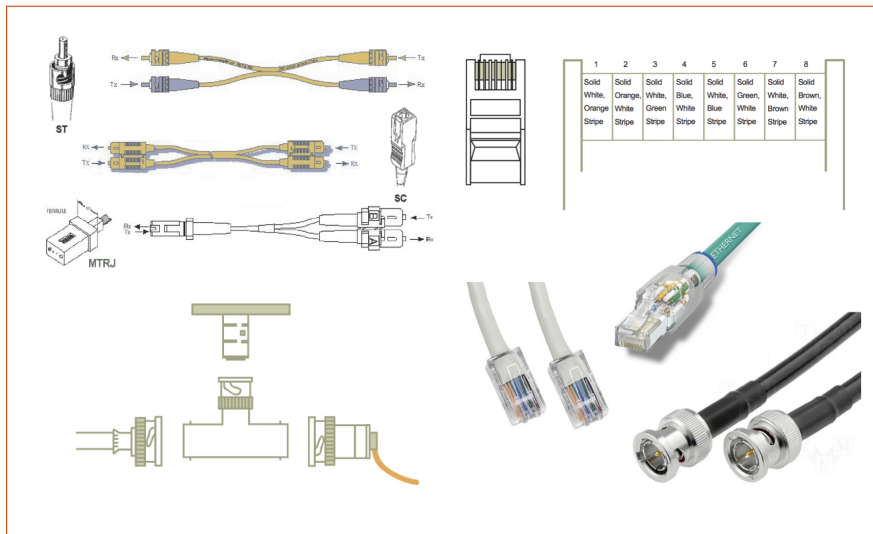


Figura: Mezzi che supportano il protocollo Ethernet.

Codifica Manchester

La codifica usata per i segnali binari è la **codifica Manchester**, con 2 possibili modalità di implementazione:

- 1 Il periodo di un bit è suddiviso in 2 intervalli uguali: il bit **1** è trasmesso con un livello alto nel primo intervallo e basso nel secondo e viceversa per il bit **0**;
- 2 Il periodo di un bit è suddiviso in 2 intervalli uguali: il bit **1** è trasmesso con un livello basso nel primo intervallo e alto nel secondo e viceversa per il bit **0**.

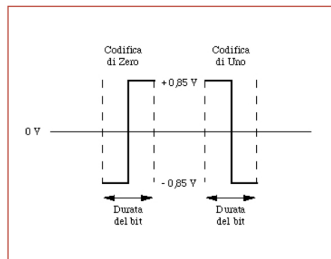


Figura: Codifica Manchester [1].

- La transizione nella parte centrale del bit permette la sincronizzazione tra trasmettitore e ricevente grazie a una serie iniziale di **0** o di **1** e permette un'individuazione più semplice degli errori di trasmissione;
- La velocità del clock di sistema è uguale alla velocità dei dati (es. per $10 \frac{Mb}{s}$ la frequenza è $10MHz$);
- A $10 \frac{Mb}{s}$ si ha un picco di potenza a $10MHz$ e un altro a $30MHz$, che è il limite imposto dalla **Federal Communication Commission (FCC)**;
- È utilizzata nelle versioni Ethernet fino a $10 \frac{Mb}{s}$; le versioni più veloci usano una codifica a **Transizione Multilivello 3 (MLT-3)**, con andamento ciclico a livelli di voltaggio **-1, 0, +1, 0**, (**1** cambia stato, **0** rimane nello stesso stato) e armoniche con emissione di potenza fino a $31.25MHz$.

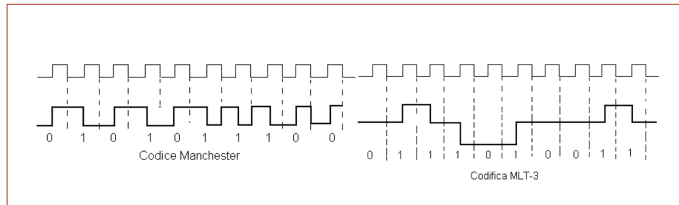


Figura: Confronto tra codifica Manchester e MLT-3.

Trasmissione e ricezione

La comunicazione tra due nodi mediante il protocollo Ethernet presenta le seguenti caratteristiche:

- 1 Il mittente invia il messaggio in modalità **broadcast** e **carrier sensing**, cioè tutti i nodi sono in ascolto;
- 2 Solo il nodo che riconosce nel messaggio il proprio indirizzo lo recepisce, mentre tutti gli altri lo scartano;
- 3 Può essere impostata una modalità di comunicazione **multicast**, nella quale i pacchetti vengono accettati indipendentemente dall'indirizzo di destinazione;
- 4 Il messaggio può contenere degli errori e viene quindi controllato con opportuni algoritmi: se non supera il controllo il messaggio è scartato.

Limiti

- Non è prevista la ritrasmissione del frame scartato, né una notifica della sua perdita agli strati superiori;
- Il compito di provvedere alla ritrasmissione dei frame perduti viene effettuato agli strati superiori.

Trasmissione e ricezione

La comunicazione tra due nodi mediante il protocollo Ethernet presenta le seguenti caratteristiche:

- 1 Il mittente invia il messaggio in modalità **broadcast** e **carrier sensing**, cioè tutti i nodi sono in ascolto;
- 2 Solo il nodo che riconosce nel messaggio il proprio indirizzo lo recepisce, mentre tutti gli altri lo scartano;
- 3 Può essere impostata una modalità di comunicazione **multicast**, nella quale i pacchetti vengono accettati indipendentemente dall'indirizzo di destinazione;
- 4 Il messaggio può contenere degli errori e viene quindi controllato con opportuni algoritmi: se non supera il controllo il messaggio è scartato.

Limiti

- Non è prevista la ritrasmissione del frame scartato, né una notifica della sua perdita agli strati superiori;
- Il compito di provvedere alla ritrasmissione dei frame perduti viene effettuato agli strati superiori.

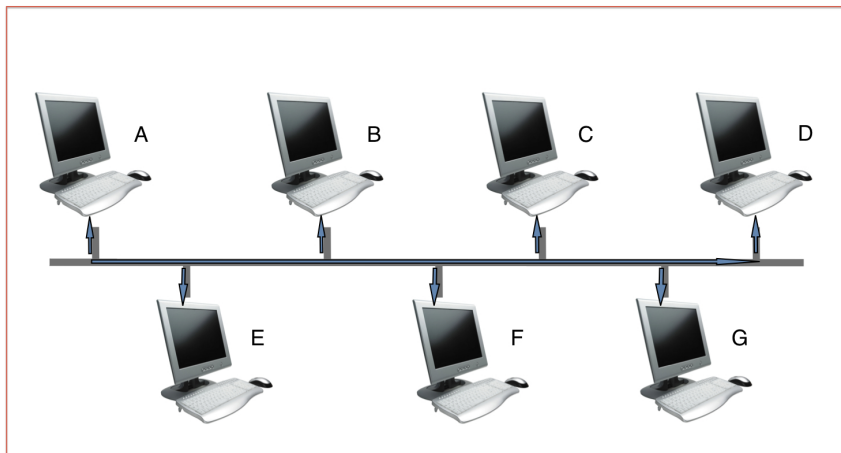


Figura: Topologia di una rete Ethernet a modalità broadcast e carrier sensing.

CSMA/CD

Eventuali collisioni, dovute all'invio simultaneo di messaggi da parte di nodi differenti, sono gestite secondo la tipologia di accesso al bus multiplo nella versione **CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)**.

- Un nodo vuole inviare un messaggio e si mette in ascolto per verificare che il mezzo di trasmissione sia libero;
- Se il mezzo trasmissivo è libero inizia la comunicazione;

Nel caso in cui due nodi iniziano a trasmettere simultaneamente, essendo in ascolto, rilevano la collisione e si procede nel modo seguente:

- Viene interrotta la trasmissione;
- I nodi attendono qualche istante: il tempo di attesa è determinato da un algoritmo che prende il nome di **back-off**;
- I nodi riprovano a trasmettere in tempi diversi.

La fase in cui viene controllato il traffico sulla rete è la ***Collision Detection***:

- Se un nodo invia un segnale e non riceve segnali da altri nodi, considera il frame spedito;
- Il segnale che permette di verificare una collisione si ottiene confrontando il segnale ricevuto con quello trasmesso: se coincidono è avvenuta una collisione; la lunghezza minima del pacchetto è di 72 byte e se i primi 64 vengono trasmessi senza problemi il canale è considerato libero;
- Il nodo in questione blocca la trasmissione e trasmette un segnale di disturbo (**jamming signal**) di 48 bit per comunicare agli altri nodi l'avvenuta collisione e per bloccarne la trasmissione.
- Si genera un algoritmo di back-off.

È improbabile che si verifichi una collisione ma bisogna considerare le distanze tra i nodi e i tempi di propagazione dei segnali elettrici sui mezzi trasmissivi.

La fase in cui viene controllato il traffico sulla rete è la ***Collision Detection***:

- Se un nodo invia un segnale e non riceve segnali da altri nodi, considera il frame spedito;
- Il segnale che permette di verificare una collisione si ottiene confrontando il segnale ricevuto con quello trasmesso: se coincidono è avvenuta una collisione; la lunghezza minima del pacchetto è di 72 byte e se i primi 64 vengono trasmessi senza problemi il canale è considerato libero;
- Il nodo in questione blocca la trasmissione e trasmette un segnale di disturbo (**jamming signal**) di 48 bit per comunicare agli altri nodi l'avvenuta collisione e per bloccarne la trasmissione.
- Si genera un algoritmo di back-off.

È improbabile che si verifichi una collisione ma bisogna considerare le distanze tra i nodi e i tempi di propagazione dei segnali elettrici sui mezzi trasmissivi.

Nella fase di trasmissione consideriamo i seguenti parametri:

Collision window É la finestra temporale durante la quale un nodo rileva la collisione: comprende i dati e gli indirizzi (escluso il preambolo del frame) e la sua durata minima è:

$$t_{CW_{min}} = \frac{N_{Bit_{payload}}^{min}}{bitRate}.$$

Tempo minimo di trasmissione Sottraendolo al tempo di collision window, indica il margine di sicurezza per rilevare una collisione:

$$t_{tras.min} = \frac{N_{Bit_{frame}}^{min}}{bitRate}.$$

Round Trip Delay (RTD) É il tempo di propagazione del segnale sul cavo nel caso peggiore.

Path Delay Value (PDV) É il peggiore round trip delay e deve essere inferiore al tempo minimo di trasmissione.

Estensione massima teorica É la massima distanza tra due nodi comunicanti nel caso di massimo round trip delay:

$$L_{max} = c \cdot \frac{PDV}{2}.$$

Il segnale si attenua, motivo per cui si inseriscono dei **repeater** per amplificarlo, ripristinarlo e risincronizzarlo.

Inter Packet Gap (IPG) É il tempo che intercorre tra un pacchetto e quello successivo.

Limiti

Ethernet non garantisce la consegna di un frame e neppure che venga consegnato in un tempo preciso.

Path Delay Value (PDV) É il peggiore round trip delay e deve essere inferiore al tempo minimo di trasmissione.

Estensione massima teorica É la massima distanza tra due nodi comunicanti nel caso di massimo round trip delay:

$$L_{max} = c \cdot \frac{PDV}{2}.$$

Il segnale si attenua, motivo per cui si inseriscono dei **repeater** per amplificarlo, ripristinarlo e risincronizzarlo.

Inter Packet Gap (IPG) É il tempo che intercorre tra un pacchetto e quello successivo.

Limiti

Ethernet non garantisce la consegna di un frame e neppure che venga consegnato in un tempo preciso.

Frame

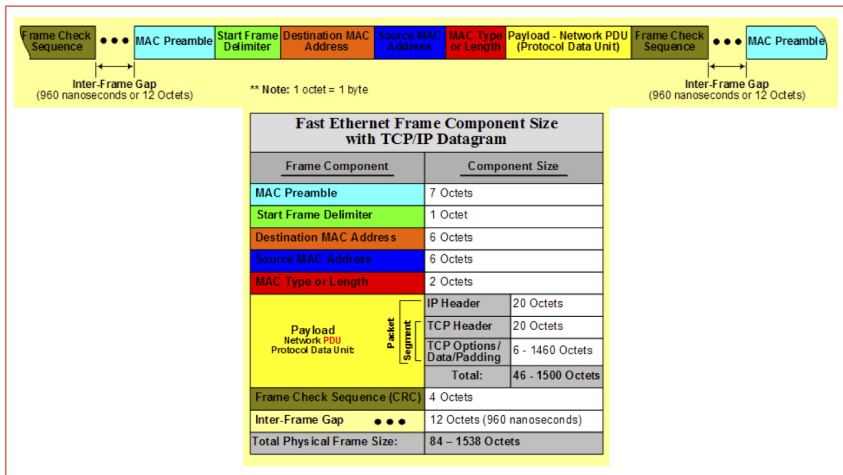


Figura: Frame Ethernet completo.

Preamble (7 byte) Hanno valore 10101010 e permettono la sincronizzazione del ricevitore;

Start Frame Delimiter (SFD, 1 byte) Definisce la fine del preambolo e assume valore 10101011, in cui gli ultimi 2 bit servono a segnalare l'inizio della trama e l'invio di un informazione al destinatario; è protetto dalla violazione della *codifica Manchester*;

MAC destination address (6 byte) Specifica l'indirizzo MAC del destinatario e qualora non corrispondesse, il livello fisico del protocollo lo elimina e non lo invia agli strati successivi;

MAC source address (6 byte) Specifica l'indirizzo MAC del mittente;

Etherthype or lenght (2 byte) Indica che il tipo di protocollo utilizzato a livello rete di trasmissione è quello Ethernet (Ethernet II), oppure la lunghezza dei dati (IEEE 802.3);

802.1Qtag (4 byte) Si tratta di uno standard opzionale che definisce la Virtual LAN (VLAN), per la gestione della priorità del traffico delle informazioni;

Payload (46 ÷ 1500 byte) É l'insieme dei bit che rappresenta l'informazione vera e propria: possono avere una lunghezza variabile compresa tra un massimo di bit, oltre il quale i dati vengono suddivisi in pacchetti, e un minimo che se non raggiunto richiede l'inserimento del **padding** (riempitivo) di lunghezza opportuna;

Frame Check Sequence (FCS, 4 byte) Si tratta di codici per la rilevazione di errori di trasmissione: il ricevente calcola il **CRC (Controllo a Ridondanza Ciclica)** mediante un algoritmo e lo confronta con quello ricevuto in questo campo;

Interframe gap (12 byte) Si tratta di un messaggio che indica uno stato temporaneo di riposo prima dell'invio del frame successivo.

Throughput

Il *throughput* è definito come il numero di bit utili nell'unità di tempo e per il protocollo Ethernet assume i seguenti valori:

$$\textit{Throughput} = \eta \cdot \textit{bitRate}$$

dove η (**max.** 97.53%) corrisponde all'efficienza del protocollo calcolata come:

$$\eta = \frac{N_{\textit{BitPayload}}}{N_{\textit{BitFrame}}}.$$

Il valore massimo che può assumere, per esempio, nel caso di *bitRate* pari a 100Mbps, è di 97.53 Mbps.

Un altro parametro, da non confondere con l'efficienza del protocollo, è l'*utilizzazione del canale* (CU), che prescinde dal tipo di dato trasmesso e considera il tempo di elaborazione dati (data e acknowledgement packets) e il tempo totale:

$$CU = \frac{t_{\textit{trasm.data}}}{t_{\textit{tot}}}.$$

Throughput

Il *throughput* è definito come il numero di bit utili nell'unità di tempo e per il protocollo Ethernet assume i seguenti valori:

$$\textit{Throughput} = \eta \cdot \textit{bitRate}$$

dove η (**max.** 97.53%) corrisponde all'efficienza del protocollo calcolata come:

$$\eta = \frac{N_{\textit{BitPayload}}}{N_{\textit{BitFrame}}}.$$

Il valore massimo che può assumere, per esempio, nel caso di *bitRate* pari a 100Mbps, è di 97.53 Mbps.

Un altro parametro, da non confondere con l'efficienza del protocollo, è l'**utilizzo del canale (CU)**, che prescinde dal tipo di dato trasmesso e considera il tempo di elaborazione dati (data e acknowledgement packets) e il tempo totale:

$$CU = \frac{t_{\textit{trasm.data}}}{t_{\textit{tot}}}.$$

Shared Ethernet

Le caratteristiche principali di una rete shared Ethernet sono:

- Presenta una tipica **topologia a stella**;
- L'elemento fondamentale è l'**hub** (ripetitore): è una struttura completamente passiva, che interviene al livello fisico del modello ISO/OSI e si limita a ritrasmettere i segnali senza alcuna rielaborazione dei dati;
- Vengono ripetuti tutti i pacchetti di dati, sia frammenti di collisioni, sia eventuali errori;
- Riceve un segnale da una delle sue porte e lo ritrasmette a tutte le altre utilizzando lo stesso mezzo fisico, operando una frammentazione della banda di trasmissione;
- Lo standard CSMA/CD è alla base delle gestione delle informazioni nel mezzo.

Limiti

- Non garantisce alte prestazioni in termini di determinismo della comunicazione;
- Non permette una comunicazione di tipo real-time;
- Non è adatto a un uso in fabbrica o per applicazioni di automazione.

Shared Ethernet

Le caratteristiche principali di una rete shared Ethernet sono:

- Presenta una tipica **topologia a stella**;
- L'elemento fondamentale è l'**hub** (ripetitore): è una struttura completamente passiva, che interviene al livello fisico del modello ISO/OSI e si limita a ritrasmettere i segnali senza alcuna rielaborazione dei dati;
- Vengono ripetuti tutti i pacchetti di dati, sia frammenti di collisioni, sia eventuali errori;
- Riceve un segnale da una delle sue porte e lo ritrasmette a tutte le altre utilizzando lo stesso mezzo fisico, operando una frammentazione della banda di trasmissione;
- Lo standard CSMA/CD è alla base delle gestione delle informazioni nel mezzo.

Limiti

- Non garantisce alte prestazioni in termini di determinismo della comunicazione;
- Non permette una comunicazione di tipo real-time;
- Non è adatto a un uso in fabbrica o per applicazioni di automazione.

Switched Ethernet

Le caratteristiche principali di una rete switched (commutata) Ethernet sono:

- Presenta una **topologia a stella**;
- L'elemento fondamentale è lo **switch** (commutatore): sono elementi attivi, che intervengono al livello di data-link del modello ISO/OSI, gestendo in modo più efficiente il traffico di informazioni;
- Un utente collegato a uno switch si vede assegnata tutta la banda e non deve dividerla con nessuno;
- Sono in grado di leggere l'indirizzo del destinatario e in grado di trasmettere un pacchetto di dati solo attraverso la porta ad esso collegata;
- Non si ha contesa del mezzo fisico e si evitano le collisioni;
- Opportunamente configurati, permettono di effettuare operazioni di diagnostica, controllo della sicurezza, prioritizzazione del traffico di informazioni.

I principali vantaggi sono:

Determinismo Garantisce una trasmissione real time nei tempi voluti;

Latenza I *tempi morti* sono piccolissimi dell'ordine dei $30 \div 100 \mu s$;

Standardizzazione Permette maggiore interoperabilità tra dispositivi di produttori diversi.

Limite

Elevati costi economici di implementazione degli switch.

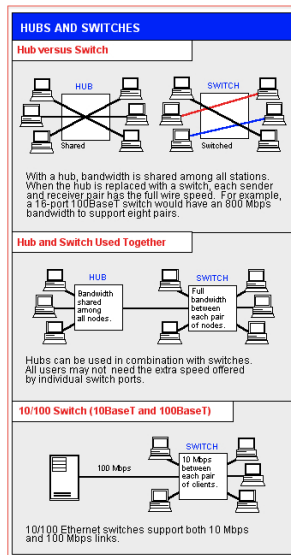


Figura: Shared Ethernet e switched Ethernet.

Internet Protocol

Protocollo che gestisce il livello di collegamento (**ISO/OSI 3**).

IP si occupa di:

- Definire il formato delle unità elementari di dati (***datagram***-pacchetto) da inviare sul mezzo fisico;
- Fornire un metodo di indirizzamento;
- Scegliere il percorso che un datagramma deve seguire per giungere a destinazione (***instradamento***);
- Definire le regole che servono a implementare il concetto di consegna inaffidabile di datagramma;
- Controllare l'errore sull'intestazione IP (***IP header***).

IP, inoltre, fornisce un servizio:

Non connesso Ogni datagramma è trattato separatamente; pacchetti relativi alla stessa sessione potrebbero seguire percorsi differenti;

Inaffidabile Non vengono garantite la consegna del datagramma al destinatario, l'ordine ed il tempo di consegna, la duplicazione e la perdita di pacchetti e gli errori nella trasmissione dei dati;

Best try Al meglio delle possibilità, il protocollo non decide mai deliberatamente di eliminare un datagramma.

Trasmissione

- 1 Riceve un blocco di dati dal livello superiore (generalmente il livello di trasporto);
- 2 Se necessario lo suddivide in pacchetti con dimensione massima $64kB$, e incapsula i pacchetti aggiungendovi un'intestazione contenente una serie di informazioni tra cui l'indirizzo del nodo destinatario e del mittente;
- 3 Sceglie il nodo successivo a cui consegnare il pacchetto;
- 4 Inoltra il pacchetto (o i corrispondenti frammenti) al nodo successivo attraverso l'opportuna interfaccia di rete.

Ricezione

- 1 Riceve un pacchetto dal livello di collegamento, ne esamina l'intestazione e ne verifica la validità;
- 2 Se l'indirizzo del nodo ricevente corrisponde alla destinazione del pacchetto, estrae i dati contenuti (payload) e li invia al protocollo di livello superiore (trasporto);
- 3 Se i dati di origine sono stati frammentati in più pacchetti, attende la ricezione di tutti i pacchetti relativi e li riassume nell'ordine corretto;
- 4 Se il pacchetto deve essere ritrasmesso ad un nodo posizionato in una sottorete, esegue le corrispondenti operazioni di instradamento.

Sequenzializzazione

Non essendo garantito l'ordine di consegna dei pacchetti, i datagrammi possono essere ricevuti fuori ordine, in particolare in sistemi che includono più reti.

Per riassemblare in modo corretto una serie di pacchetti viene utilizzato un meccanismo di *sequenzializzazione*.

All'interno dell'header vengono inserite informazioni che indicano se i dati originali sono stati frammentati ed eventualmente la posizione relativa del datagramma.

Il destinatario utilizza queste informazioni per riordinare i pacchetti e individuare quelli mancanti. La sequenzializzazione può essere usata per individuare i pacchetti duplicati e scartare le copie.

Sequenzializzazione

Non essendo garantito l'ordine di consegna dei pacchetti, i datagrammi possono essere ricevuti fuori ordine, in particolare in sistemi che includono più reti.

Per riassemblare in modo corretto una serie di pacchetti viene utilizzato un meccanismo di *sequenzializzazione*.

All'interno dell'header vengono inserite informazioni che indicano se i dati originali sono stati frammentati ed eventualmente la posizione relativa del datagramma.

Il destinatario utilizza queste informazioni per riordinare i pacchetti e individuare quelli mancanti. La sequenzializzazione può essere usata per individuare i pacchetti duplicati e scartare le copie.

Instradamento dati

Il protocollo IP utilizza, per l'instradamento, una tavola di routing contenente:

- indirizzo IP di destinazione (della rete o completo);
- indirizzo di **next-hop router** o di **next-id** direttamente connesso;
- flag che specificano il tipo dei due indirizzi precedenti;
- specifiche relative al tipo di interfaccia di rete per la trasmissione, su cui immettere il datagramma.

Quando avviene la ricezione di un pacchetto viene confrontato l'indirizzo di destinazione con quelli contenuti sulla tavola. Possono essere eseguite le seguenti operazioni:

Matching con l'indirizzo di host completo Manda il pacchetto al next-hop router o all'interfaccia direttamente connessa (**point-to-point**);

Matching con l'indirizzo di rete Manda il pacchetto al next-hop router o al successivo nodo direttamente collegato;

Default route Manda il pacchetto al next-hop router indicato, altrimenti **packet undeliverable**;

IP header

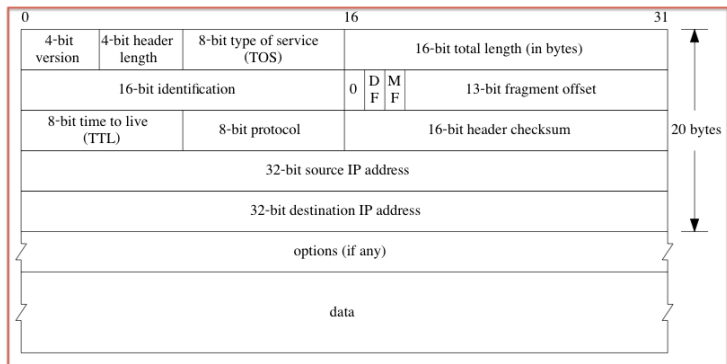


Figura: IP header.

- Vers (4 bit)** Versione del protocollo usata (es. IPv4, IPv6);
- HLEN (4 bit)** Lunghezza dell'intestazione specificata in word di 4 byte (min 20, max 60 byte);
- TOS (Type Of Service, 8 bit)** Quando supportato dalla rete, permette di specificare un livello di qualità di servizio richiesto dall'utente (es. affidabilità o velocità di trasferimento); in passato non usato, ora utilizzato da reti a servizi differenziati (**Differentiated Services**);
- Total length (16 bit)** Specifica la lunghezza totale (inclusa l'intestazione) del datagramma, misurata in byte (valore max: $2^{16} = 65536$ bytes);
- Identification (16 bit)** Numero identificativo del datagramma, è ereditato dagli eventuali frammenti;

Flags (3 bit) È usato per la frammentazione e i 3 bit sono identificati come:

X Non usato e posto a zero;

DF (Don't Fragment) Se 0 indica che il datagramma può essere frammentato, se 1 no;

MF (More Fragment) Se 0 indica che è l'ultimo frammento, se 1 che ci sono altri frammenti;

Fragment Offset (13 bit) Posizione del frammento all'interno del datagramma, espresso in unità di 8 byte; può numerare 8192 frammenti. Se uno o più frammenti non vengono ricevuti (a destinazione), verrà scartato l'intero datagramma;

Time to Live (8 bit) Indica il numero massimo di salti residui che il datagramma può effettuare in rete. E' aggiornato da ogni router attraversato;

Protocol (8 bit) Indica a quale protocollo dello stato superiore deve essere trasferito il contenuto informativo del datagramma (es. TCP=6, UDP=17, ICMP=1);

Header Checksum (16 bit) Controllo di errore sull'intestazione, calcolato come somma complemento a 1. Se viene rivelato un errore, il datagramma viene scartato;

Source Address (32 bit) Indirizzo della sorgente;

Destination IP Address (32 bit) Indirizzo di destinazione IP (ovvero dell'host, non dell'utente finale);

Options (multipli di 8 bit) Campo di lunghezza variabile che può essere omissivo. È composto da tanti byte quante sono le opzioni implementate, ad esempio:

Source Route Option (strict o loose) Consente al mittente di specificare i nodi attraverso i quali vuole che transiti il datagramma;

Record Route Option (RRO) Consente al mittente di creare una lista vuota di indirizzi IP in modo che ogni nodo attraversato vi inserisca il suo indirizzo;

Timestamp Option Come RRO con in più l'istante temporale in cui il datagramma attraversa i diversi nodi.

Padding Rende la lunghezza dell'intestazione multiplo intero di 32 bit tramite l'introduzione di zeri.

Transmission Control Protocol

Transmission Control Protocol (TCP) è un protocollo di rete che implementa il livello di trasporto (**ISO/OSI 4**).

- È un servizio connesso, con modello di comunicazione **client/server**.
- È **connection oriented**, cioè prima di trasmettere dati deve stabilire la comunicazione che viene chiusa quando non più necessaria;
- Il trasporto di un flusso di byte è **full-duplex**;
- Garantisce che i dati trasmessi arrivino in ordine e una volta sola (**at most once**);
- Effettua un controllo di errore sui pacchetti;
- Effettua il controllo di flusso tra terminali in connessione e il controllo della congestione di rete;
- Supporta un servizio di **multiplexing** delle connessioni su un host, attraverso il meccanismo delle porte.

Connessione

La connessione è un'operazione preliminare che prevede la conoscenza degli indirizzi IP di client e server (**3-way handshake**).

Richiesta di connessione Il client **A** invia un segmento *SYN* al server **B**. Il flag $SYN=1$ e il campo **Sequence Number (SN)** contiene il valore che specifica l'**Initial Sequence Number (ISN)** di **A**.

Accettazione della connessione **B** invia un segmento *SYN/ACK* ad **A**. I flag $SYN=1$ e $ACK=1$, il campo SN contiene l'ISN di **B** e il campo **Acknowledgment Number (AN)** contiene il valore $ISN(A)+1$ confermando la ricezione del ISN di **A**.

Conferma **A** invia un segmento *ACK* a **B**. Il campo AN contiene il valore $ISN(B)+1$ confermando la ricezione del ISN di **B**. I messaggi hanno il campo dati vuoto e sono costituiti solo dall'header.

Al termine della connessione, TCP effettua la fase **chiusura della connessione** con lo scambio di tre o quattro messaggi (**4-way handshake**) usando il campo di flag **FIN**.

Affidabilità della comunicazione

Per garantire la trasmissione dei dati, TCP utilizza la tecnica **Positive Acknowledgment with Retransmission (PAR)**:

- Dopo l'invio di un blocco di dati, mantenuti in una memoria di buffer, la sorgente attende la ricezione di un messaggio di (ACK) da parte del destinatario prima di inviare un nuovo blocco.
- Contemporaneamente all'invio dei dati, la sorgente avvia un timer (**retrasmission time out**): se entro lo scadere del tempo stabilito il messaggio di ACK non è stato ricevuto, il pacchetto viene considerato perso e quindi viene ritrasmesso.

Se un messaggio è troppo grande per un singolo pacchetto TCP (generalmente 576 byte compreso l'header di IP), questo viene diviso in segmenti di lunghezza fissa che, giunti a destinazione, vengono ordinati e riassemblati.

- L'ordinamento e l'eliminazione dei duplicati viene effettuata tramite un SN inserito nell'header TCP, che viene usato per identificare e posizionare i payload dei vari segmenti al fine di ricostruire il flusso di dati originario.
- Alla ricezione di un segmento, l'host destinatario analizza il SN: se SN è quello atteso, invia il payload del segmento al processo; se SN è maggiore, memorizza temporaneamente i dati in un buffer in attesa della ricezione e della consegna di quelli precedenti non ancora ricevuti.
- I dati vengono mantenuti in memoria fino allo scadere di un timer.
- Se SN risulta inferiore a quello che il mittente si aspetta, il messaggio viene considerato un duplicato di un segmento già ricevuto e quindi scartato.

TCP controlla il flusso di messaggi in modo che i dati in trasmissione non superino le possibilità di ricezione del buffer di memoria del destinatario.

Utilizza la tecnica **Sliding Window (SW)** che consente l'invio di più byte o segmenti prima di attendere la conferma della ricezione.

- Viene definita una *finestra* di trasmissione (campo **window size**), che indica la quantità di dati che il mittente può trasmettere prima di attendere la ricezione del messaggio di ACK (la dimensione della finestra è espressa in byte, max 64 kB).
- Se la dimensione è 0, il mittente deve attendere un messaggio che indichi una finestra di dimensioni diversa da 0 per trasmettere ulteriori dati (es. buffer del destinatario saturo).
- Il destinatario specifica in ogni messaggio la dimensione della finestra, che può variare nel corso della comunicazione.
- Il valore iniziale della finestra viene indicato nella fase di connessione.

Per limitare i fenomeni di congestione, viene realizzato un controllo che definisce il numero massimo di segmenti da inviare in funzione dello stato della rete: usando come parametro di riferimento la quantità di pacchetti persi il mittente definisce una *finestra di congestione* dinamica.

TCP controlla il flusso di messaggi in modo che i dati in trasmissione non superino le possibilità di ricezione del buffer di memoria del destinatario.

Utilizza la tecnica **Sliding Window (SW)** che consente l'invio di più byte o segmenti prima di attendere la conferma della ricezione.

- Viene definita una *finestra* di trasmissione (campo **window size**), che indica la quantità di dati che il mittente può trasmettere prima di attendere la ricezione del messaggio di ACK (la dimensione della finestra è espressa in byte, max 64 kB).
- Se la dimensione è 0, il mittente deve attendere un messaggio che indichi una finestra di dimensioni diversa da 0 per trasmettere ulteriori dati (es. buffer del destinatario saturo).
- Il destinatario specifica in ogni messaggio la dimensione della finestra, che può variare nel corso della comunicazione.
- Il valore iniziale della finestra viene indicato nella fase di connessione.

Per limitare i fenomeni di congestione, viene realizzato un controllo che definisce il numero massimo di segmenti da inviare in funzione dello stato della rete: usando come parametro di riferimento la quantità di pacchetti persi il mittente definisce una *finestra di congestione* dinamica.

TCP header

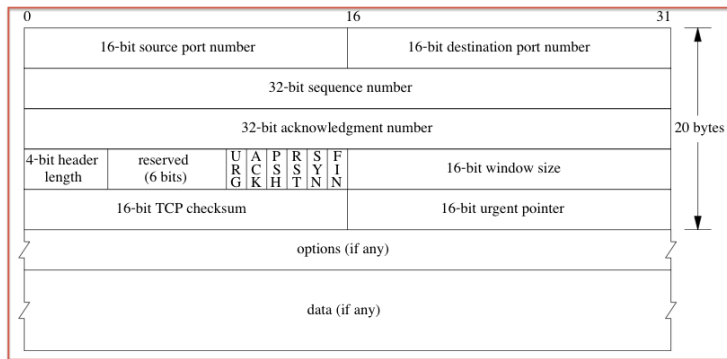


Figura: TCP header.

Source Port/Destination Port (16 bit) Identificano il numero di porta sull'host mittente e destinatario.

Sequence Number (32 bit) Indica lo distanza in byte dell'inizio del segmento all'interno del flusso di dati a partire dall'ISN, definito all'apertura della connessione.

Acknowledgment number (32 bit) Se il flag ACK=1, conferma la ricezione di un segmento e indica il valore del successivo SN che l'host mittente si aspetta di ricevere.

Data offset (4 bit) Lunghezza in word da 32 bit dell'header (da 5 word -20 byte a 15 word -60 byte in base al campo Options).

Reserved (4 bit) Per futuri sviluppi del protocollo, non utilizzati (impostati a zero).

Flags (8 x 1 bit) Attivi se impostati a 1:

- CWR (Congestion Window Reduced)** Indica che la sorgente ha ricevuto un segmento con flag ECE=1;
- ECE (ECN-Echo)** Indica che l'host supporta ECN (Explicit Congestion Notification) durante il 3-way handshake;
- URG** Indica che nel flusso sono presenti dati urgenti alla posizione indicata dal campo Urgent Pointer;
- ACK** Indica un messaggio di acknowledgment;
- PSH** Indica che i dati in arrivo non devono essere bufferizzati ma passati subito ai livelli superiori dell'applicazione;
- RST** Indica che la connessione non è valida, usato in caso di grave errore (a volte insieme a ACK per la chiusura di una connessione);
- SYN** Utilizzato nella procedura di apertura della connessione, identifica SN come ISN e sincronizza i SN dei due host;
- FIN** Utilizzato nella procedura di chiusura della connessione.

- Advertise Window (16 bit)** Indica la dimensione della finestra di ricezione (spazio disponibile del buffer nella sliding window).
- Checksum (16 bit)** Campo di controllo, calcolato come complemento a 1 della somma complemento a 1 a 16 bit dell'intero header TCP (con il campo checksum messo a zero), del payload, più indirizzo IP sorgente e destinazione (2x32 bit), un byte di zeri, un byte che indica il protocollo e due byte che indicano la lunghezza del pacchetto TCP (header + dati).
- Urgent pointer (16 bit)** Se URG=1 indica la posizione in byte rispetto al SN dei byte *urgenti* nel flusso.
- Options** Opzioni (facoltative) per usi del protocollo avanzati.

User Datagram Protocol

User Datagram Protocol (UDP) è un protocollo definito al livello di trasporto (**ISO/OSI 4**).

- È un protocollo di tipo non connesso;
- Non garantisce l'affidabilità della connessione, il controllo del flusso di dati e la correzione degli errori;
- Il soggetto della comunicazione è il singolo datagramma e non l'intero flusso di dati;
- È semplice e presenta un ridotto overhead dei segmenti, per cui è più veloce e presenta basse latenze;
- Viene utilizzato nei casi in cui l'affidabilità non è necessaria od ove questa ed il controllo del flusso vengono implementate da protocolli di livello superiore, o nel caso si abbiano forti vincoli sulla velocità e l'economia di risorse della rete.

- L'intestazione dei messaggi UDP ha dimensione 8 bytes ed è costituita da 4 campi:

Source Port (16 bit) Identifica il numero di porta sull'host mittente;

Destination Port (16 bit) Identifica il numero di porta sull'host destinatario;

Length (16 bit) Indica la lunghezza totale del segmento UDP (header + payload)

Checksum (16 bit) Campo di controllo di integrità del segmento.

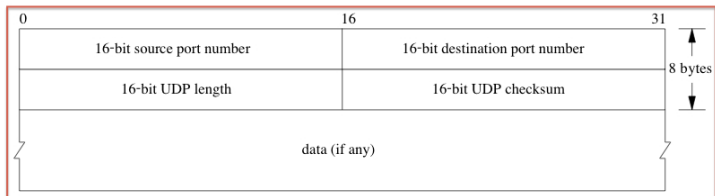


Figura: UDP header.

Incapsulamento

Nel passaggio dai livelli più alti della pila ISO/OSI ai più bassi, i dati veri e propri vengono incapsulati in base ai vari protocolli.

Ethernet header 22byte;

IP header 20byte;

TCP header 20byte;

Dati/Padding 6 – 1460byte;

Trailer Ethernet 16byte.

$$byte_{TOTMAX} = 1538$$

$$byte_{Payload} = 1500$$

La massima efficienza del protocollo, con la dimensione massima dei dati Ethernet:

$$\eta_{MAX} = \frac{1460}{1538} = 94.93\%$$

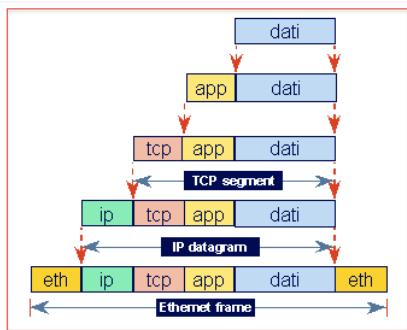


Figura: Incapsulamento dati.

Industrial Ethernet

Industrial Ethernet è la soluzione che adotta lo standard Ethernet, originariamente sviluppato per il settore delle telecomunicazioni, a livello industriale all'interno di una fabbrica, per il controllo dei processi e dei macchinari.

Supporta i seguenti protocolli all'interno della pila ISO/OSI:

- *Ethernet* al livello fisico e di data link;
- *TCP/IP* ai livelli di network e trasporto;
- *Protocolli derivati* (es. ProfiNet, EtherCAT, SERCOS-3) ai livelli più alti.

Benefici

- Si basa su una struttura switched con la possibilità di comunicazione real time tra i vari livelli della fabbrica;
- Permette di ottimizzare i processi migliorandone l'efficienza e l'organizzazione;
- Permette di ottenere risparmi anche in termini economici;
- Riduce i rischi e provvede a un sistema di protezione e controllo più robusto;
- Consente una maggiore reperibilità degli strumenti e provvede a uno standard *brand independent*, per cui l'impresa si svincola da un produttore ben preciso;
- Si ottiene un'estrema semplificazione della progettazione, della manutenzione e del controllo della rete;
- La grande abbondanza e reperibilità di documentazione sul protocollo semplifica la formazione del personale specializzato e la curva di apprendimento di Ethernet risulta estremamente rapida.

Differenze tra Industrial Ethernet ed Ethernet

Nonostante Industrial Ethernet sia basato sullo standard tradizionale Ethernet, l'implementazione nell'ambiente di fabbrica è diverso a più livelli.

- *A livello hardware* Industrial Ethernet deve operare in un tipico ambiente di fabbrica, soggetto a sollecitazioni di vario tipo (vibrazioni e alte temperature). Sono necessari gusci protettivi e sistemi di raffreddamento;
- La strumentazione deve essere flessibile e in grado di essere adattata alle variazioni richieste dall'ambiente di fabbrica;
- *A livello di controllo e automazione* il range di intervento è diverso nonostante entrambi supportino lo standard IP: Industrial Ethernet interviene a livello locale in una rete interna comunicando a volte in modalità multicast; Ethernet comunica verso l'esterno e spesso in modalità unicast;

- Industrial Ethernet presenta un maggiore determinismo nelle trasmissioni che devono essere real time e continue;
- Industrial Ethernet ottimizza l'accesso sincrono ai dati e include una serie di servizi di controllo della comunicazione multicast, Quality of Services (QoS) e virtual LANs, che lo rendono più sicuro e affidabile;
- Industrial Ethernet presenta una topologia switched, in grado di garantire una migliore gestione del traffico di informazione e tre principali caratteristiche:

Packet loss under congestion Assicura che le informazioni più importanti giungano a destinazione velocemente e continuamente e si occupa di definire le priorità di comunicazione evitando congestioni.

Broadcast and multicast Fa in modo che l'informazione arrivi solamente ai nodi interessati, riducendo il traffico di informazioni ed evitando che i client elaborino informazioni superflue.

Network analyzers Permette di monitorare e registrare da remoto lo stato della rete ottimizzandone l'uso.

Security Verifica che i device siano connessi ed elimina i tipi comuni di attacco, come **broadcast-multicast storms** (un device produce una quantità notevole di messaggi broadcast congestionando la rete); applica VLANs e una lista di controllo accessi (**ACLs**) per snellire la comunicazione tra un nodo e un altro.

Diagnostics Permette di risolvere eventuali problemi all'interno della fabbrica gestendo informazioni di diagnostica relative allo status dei dispositivi o al traffico di informazioni che i nodi generano o ricevono.

Livelli di comunicazione

I principali livelli di comunicazione Ethernet in una fabbrica sono tre:

Rete gestionale Impiegata per operazioni di gestione aziendale, per i rapporti con clienti e fornitori, per la realizzazione di una rete Intranet aziendale e per integrare i servizi di altre reti sottostanti; a questo livello risulta già implementato in molti settori.

Rete di controllo Gestisce PLC, PC, elaboratori embedded, interfacce uomo macchina (HMI) e tutti i componenti di automazione e la loro interazione con l'operatore; comportano un'incidenza minima nel costo, soprattutto se si ha già una base di installato.

Rete di interfacciamento con in campo Si occupa della gestione degli I/O di sensori e attuatori e di tutti i dispositivi che intervengono a livello di processo mettendo in comunicazione i controllori tra loro e questi con i trasduttori; l'impiego a questo livello è ancora marginale.

Livelli di comunicazione

I principali livelli di comunicazione Ethernet in una fabbrica sono tre:

Rete gestionale Impiegata per operazioni di gestione aziendale, per i rapporti con clienti e fornitori, per la realizzazione di una rete Intranet aziendale e per integrare i servizi di altre reti sottostanti; a questo livello risulta già implementato in molti settori.

Rete di controllo Gestisce PLC, PC, elaboratori embedded, interfacce uomo macchina (HMI) e tutti i componenti di automazione e la loro interazione con l'operatore; comportano un'incidenza minima nel costo, soprattutto se si ha già una base di installato.

Rete di interfacciamento con in campo Si occupa della gestione degli I/O di sensori e attuatori e di tutti i dispositivi che intervengono a livello di processo mettendo in comunicazione i controllori tra loro e questi con i trasduttori; l'impiego a questo livello è ancora marginale.

Livelli di comunicazione

I principali livelli di comunicazione Ethernet in una fabbrica sono tre:

Rete gestionale Impiegata per operazioni di gestione aziendale, per i rapporti con clienti e fornitori, per la realizzazione di una rete Intranet aziendale e per integrare i servizi di altre reti sottostanti; a questo livello risulta già implementato in molti settori.

Rete di controllo Gestisce PLC, PC, elaboratori embedded, interfacce uomo macchina (HMI) e tutti i componenti di automazione e la loro interazione con l'operatore; comportano un'incidenza minima nel costo, soprattutto se si ha già una base di installato.

Rete di interfacciamento con in campo Si occupa della gestione degli I/O di sensori e attuatori e di tutti i dispositivi che intervengono a livello di processo mettendo in comunicazione i controllori tra loro e questi con i trasduttori; l'impiego a questo livello è ancora marginale.

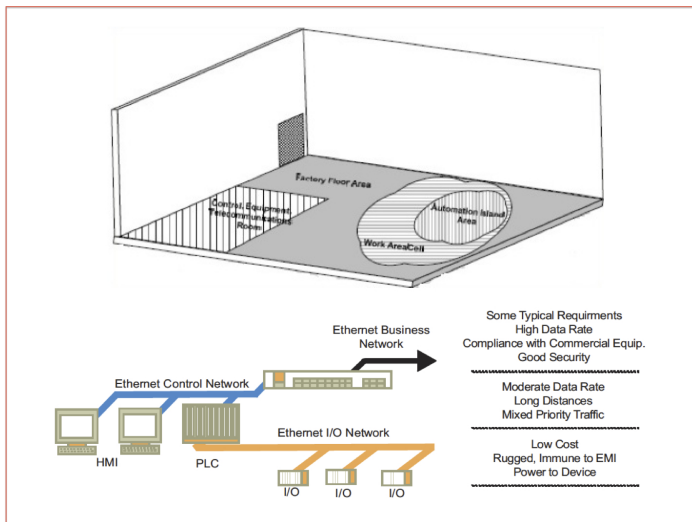


Figura: Ambiente industriale e livelli in cui viene implementato Industrial Ethernet.

Necessità dell'ambiente industriale

Per rispondere alle necessità dell'ambiente industriale e delle caratteristiche applicative, Industrial Ethernet deve soddisfare una serie di specifiche riguardanti:

- alimentazione dei componenti;
- compatibilità con l'ambiente industriale;
- sicurezza;
- affidabilità;
- determinismo.

Alimentazione dei componenti

- Sia per quelli di processo che di rete, è in corrente continua a 24V, per assicurare la protezione degli operatori e rispettare le esigenze di sicurezza degli ambienti industriali (es. ambienti a rischio esplosione o incendio).
- È prevista anche l'alimentazione direttamente sul cavo di rete in caso di **twisted pairs** (es. negli standard 10BaseT e 100BaseT vengono usati due dei quattro doppini, in 1000BaseT l'alimentazione viene sovrapposta ad uno dei doppini del segnale).
- Questi metodi di alimentazione vengono definiti dallo standard **802.3af**.

Compatibilità con l'ambiente industriale

In ambiente industriale, l'hardware deve resistere a sollecitazioni quali temperatura, interferenze elettromagnetiche, vibrazioni ed esposizione ad agenti chimici.

Connettori

Connettori industriali M12 Protezione IP67 (infiltrazioni d'acqua e polvere), supporta velocità ridotte;

Connettore seriale DB-9 Robusto e veloce, non garantisce un alto livello di protezione;

Connettori RJ45 o LC e MTRJ (per fibra ottica) con copri-connettore M18, economico, garantisce protezione IP67 (soluzione più diffusa).

Cavi

Fibre ottiche Immuni alle interferenze elettromagnetiche e robuste, sono costose e hanno limiti sui raggi di curvatura;

Doppino con canalina Con cavo non schermato e canalina in plastica evita disturbi capacitivi, è economico, supporta distanze ridotte, è sensibile alle interferenze elettromagnetiche e ha ridotta resistenza.

Compatibilità con l'ambiente industriale

In ambiente industriale, l'hardware deve resistere a sollecitazioni quali temperatura, interferenze elettromagnetiche, vibrazioni ed esposizione ad agenti chimici.

Connettori

Connettori industriali M12 Protezione **IP67** (infiltrazioni d'acqua e polvere), supporta velocità ridotte;

Connettore seriale DB-9 Robusto e veloce, non garantisce un alto livello di protezione;

Connettori RJ45 o LC e MTRJ (per fibra ottica) con copri-connettore M18, economico, garantisce protezione **IP67** (soluzione più diffusa).

Cavi

Fibre ottiche Immuni alle interferenze elettromagnetiche e robuste, sono costose e hanno limiti sui raggi di curvatura;

Doppino con canalina Con cavo non schermato e canalina in plastica evita disturbi capacitivi, è economico, supporta distanze ridotte, è sensibile alle interferenze elettromagnetiche e ha ridotta resistenza.

Compatibilità con l'ambiente industriale

In ambiente industriale, l'hardware deve resistere a sollecitazioni quali temperatura, interferenze elettromagnetiche, vibrazioni ed esposizione ad agenti chimici.

Connettori

Connettori industriali M12 Protezione **IP67** (infiltrazioni d'acqua e polvere), supporta velocità ridotte;

Connettore seriale DB-9 Robusto e veloce, non garantisce un alto livello di protezione;

Connettori RJ45 o LC e MTRJ (per fibra ottica) con copri-connettore M18, economico, garantisce protezione **IP67** (soluzione più diffusa).

Cavi

Fibre ottiche Immuni alle interferenze elettromagnetiche e robuste, sono costose e hanno limiti sui raggi di curvatura;

Doppino con canalina Con cavo non schermato e canalina in plastica evita disturbi capacitivi, è economico, supporta distanze ridotte, è sensibile alle interferenze elettromagnetiche e ha ridotta resistenza.

Elementi della rete (switch, router)

Dispositivi di tipo industriale Maggiore affidabilità e resistenza, maggiori costi e minori prestazioni, sono usati prevalentemente a livello di campo;

Dispositivi tradizionali in contenitori protettivi Maggiore flessibilità, sono economici e poco affidabili.



Figura: Connettore M12 Industrial Ethernet [1].



Figura: Tipologie di connettori utilizzati per Industrial Ethernet.

Quality of Service

Col termine **Quality of Service (QoS)** si intendono strumenti utilizzati per garantire il rispetto di certi parametri nella comunicazione a pacchetto, del tipo: consegna fuori ordine, errori di trasmissione, perdita di dati e ritardi.

- La rete Industrial Ethernet deve essere in grado di gestire vari tipi di traffico contemporaneamente, tra cui quello riguardante le applicazioni real-time;
- La rete deve essere in grado di implementare una serie di servizi, tra cui la prioritizzazione dei messaggi, ottenuta tramite la classificazione e l'identificazione degli stessi;
- Industrial Ethernet deve gestire il traffico, sia in termini di congestione della rete che di gestione dei messaggi prioritari;
- Si deve garantire l'affidabilità della comunicazione, con basse latenze e perdite di messaggi;
- Le diverse aree della rete possono richiedere diverse tecniche di gestione di QoS: deriva la necessità di potere separare a livello logico le varie aree;
- Questi servizi vengono gestiti dai livelli superiori ad Ethernet nella pila ISO/OSI (es. TCP, UDP).

Sicurezza

Il concetto di sicurezza si basa su tre caratteristiche:

Disponibilità Mantenere operativo il sistema di automazione e controllo;

Integrità Protezione del sistema da alterazioni accidentali od intenzionali;

Confidenzialità Protezione dei dati da accessi non autorizzati.

Per soddisfare queste esigenze vengono utilizzati una serie di strumenti, tra cui:

Virtual LAN Una singola rete fisica può essere divisa in più sottoreti o reti fisicamente separate possono essere logicamente collegate (livello base di segmentazione);

Autenticazione e controllo degli accessi Protezione di dati e applicazioni sensibili che consentono solo accessi autorizzati;

Firewall Di tipo software o hardware, regolano e ispezionano il traffico e rappresentano la più efficace e robusta implementazione di segmentazione della rete;

Demilitarized zones Aree buffer tra le diverse sezioni della rete che permettono la condivisione di dati e servizi.

Affidabilità

Per le applicazioni real time è fondamentale che la rete sia costantemente disponibile, possibilmente senza periodi di inattività. È importante che l'affidabilità sia garantita a tutti i livelli della pila ISO/OSI, ma in particolare risulta critica per i primi tre livelli.

Livello fisico

Ridondanza di componenti e dispositivi (alimentazione, schede di rete, switch, router), dispositivi in grado di attuare modifiche software o hardware in linea.

Livello collegamento

Topologie di rete che garantiscano più percorsi di collegamento per ogni elemento per evitare che singoli guasti di dispositivi o collegamenti causino fuori servizio dell'intera rete o di parti di essa.

Affidabilità

Per le applicazioni real time è fondamentale che la rete sia costantemente disponibile, possibilmente senza periodi di inattività. È importante che l'affidabilità sia garantita a tutti i livelli della pila ISO/OSI, ma in particolare risulta critica per i primi tre livelli.

Livello fisico

Ridondanza di componenti e dispositivi (alimentazione, schede di rete, switch, router), dispositivi in grado di attuare modifiche software o hardware in linea.

Livello collegamento

Topologie di rete che garantiscano più percorsi di collegamento per ogni elemento per evitare che singoli guasti di dispositivi o collegamenti causino fuori servizio dell'intera rete o di parti di essa.

Le topologie più comuni sono:

Bus o albero Economiche e semplici, presentano ridotte prestazioni e affidabilità;

Stella ridondante Switch e router operanti a livelli ISO/OSI 2 e 3 collegano i dispositivi e le sottoreti (VLAN) secondo una struttura gerarchica; presentano elevate disponibilità della rete, buone prestazioni, ridotte congestioni, maggiori costi di installazione e complessità di cablaggio;

Anello Ogni dispositivo è raggiungibile attraverso due percorsi ma in generale gli anelli vengono poi collegati al resto della rete con una stella ridondante; presentano buona disponibilità della rete, complessità di cablaggio e costi d'installazione moderati.

Livello rete

Protocolli che garantiscano affidabilità e la certezza nell'instradamento dei pacchetti in base all'indirizzo IP.

Le topologie più comuni sono:

Bus o albero Economiche e semplici, presentano ridotte prestazioni e affidabilità;

Stella ridondante Switch e router operanti a livelli ISO/OSI 2 e 3 collegano i dispositivi e le sottoreti (VLAN) secondo una struttura gerarchica; presentano elevate disponibilità della rete, buone prestazioni, ridotte congestioni, maggiori costi di installazione e complessità di cablaggio;

Anello Ogni dispositivo è raggiungibile attraverso due percorsi ma in generale gli anelli vengono poi collegati al resto della rete con una stella ridondante; presentano buona disponibilità della rete, complessità di cablaggio e costi d'installazione moderati.

Livello rete

Protocolli che garantiscano affidabilità e la certezza nell'instradamento dei pacchetti in base all'indirizzo IP.

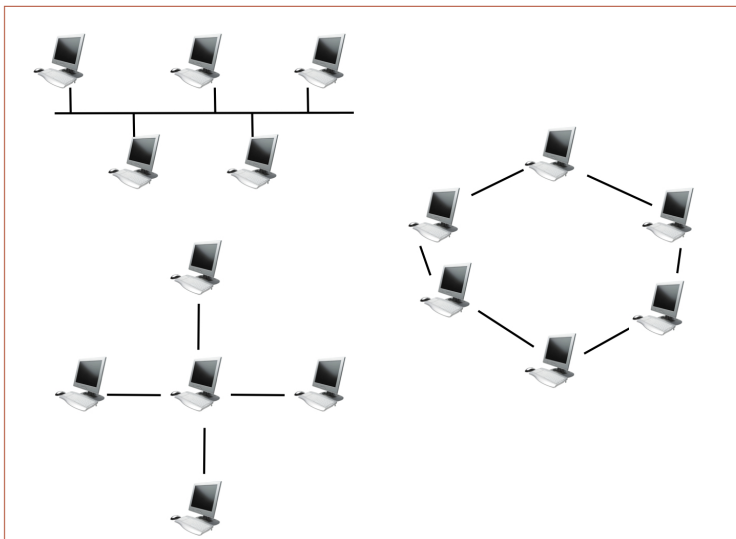


Figura: Topologie tipiche di una rete Industrial Ethernet.

Determinismo

Si intende la possibilità di prevedere i tempi di latenza dei messaggi, per garantire comunicazioni real-time tipiche dell'automazione industriale.

- Si utilizzano tecniche di **segmentazione** della rete, di **prioritizzazione** e di **filtraggio** del traffico e la gestione della **comunicazione multicast**.
- Il protocollo **Internet Group Management Protocol (IGMP)** è un protocollo IP comunemente usato per la gestione del traffico multicast per mezzo di una comunicazione di tipo **publisher/subscriber**. È in grado di inoltrare i messaggi multicast solo verso gli switch interessati, aggiornandone dinamicamente le liste dei gruppi di subscriber e mantenendo sotto controllo il traffico della rete.

- Gli algoritmi detti **Spanning Tree** sono algoritmi distribuiti basati sulla teoria dei grafi utilizzati nelle reti LAN complesse, per evitare la formazione di loop a livello data-link. Collegamenti ciclici sono causa di circolazioni indefinite di pacchetti e copie multiple che possono saturare la rete, soprattutto in presenza di traffico multicast. Il protocollo gestisce la rete facendo sì che alcuni collegamenti vengano mantenuti inattivi finché non risultino necessari a causa dell'intervento di un guasto.
- Il protocollo **Rapid Spanning Tree (802.1w)** garantisce tempi di convergenza tra *500ms* e *2000ms*.
- In alternativa all'inattivazione dei collegamenti ridondanti, lo standard **802.3ad** prevede la possibilità di **aggregazione** in un unico link logico. Per il raggruppamento è necessario che i mezzi fisici abbiano le medesime caratteristiche e siano full-duplex. Questa tecnica permette di ridurre i tempi di riconfigurazione e aumentare la banda disponibile.

Common Industrial Protocol

Common Industrial Protocol (CIP) è un protocollo di livello applicativo per l'automazione industriale, che permette l'integrazione delle reti industriali di campo con le reti d'impresa e internet.

- È progettato per integrarsi con altri protocolli per garantire interoperabilità e integrazione tra vari dispositivi;
- Si appoggia ai livelli inferiori a **ControlNET** , **DeviceNET** e **Ethernet/IP**;
- È un protocollo ad oggetti: definisce un'ampia libreria di oggetti, con relativi attributi e servizi, che comprendono sia tipici servizi di reti informative che funzioni per l'automazione;
- Il protocollo può utilizzare più modelli di comunicazione: interrogazione ciclica con metodo a divisione di tempo, cambio di stato e comunicazione di tipo **publisher/subscriber**;
- Raccoglie gruppi di oggetti standard in modelli chiamati **Device Profile**, che garantiscono l'interoperabilità tra i dispositivi di diversi costruttori.

Esistono una serie di estensioni del protocollo CIP, specifiche per l'ambiente industriale:

- CIP sync** É utilizzato per applicazioni dove la sincronizzazione è critica;
- CIP motion** Garantisce la compatibilità delle reti con le necessità di determinismo del controllo di assi;
- CIP safety** É utilizzato per gestire su una stessa rete dispositivi di controllo e di sicurezza e le relative esigenze di resistenza ai guasti.

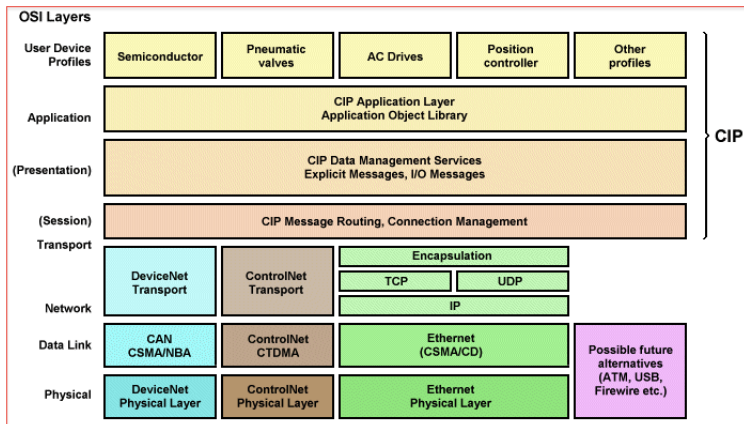


Figura: CIP nella pila ISO/OSI.

ProfiNET

ProfiNET è un protocollo di tipo ad oggetti derivato da **ProfiBUS**: definisce un'architettura modulare di automazione che non richiede un particolare sistema operativo per gestire gli oggetti.

- Si basa sugli standard **TCP/IP** e **Ethernet** ai livelli inferiori della pila ISO/OSI;
- Ai livelli più alti sfrutta le architetture **Component Object Model (COM)** e **Distributed Component Object Model (DCOM)**: COM e DCOM rappresentano la struttura che regola l'interfaccia a oggetti del protocollo e stabilisce i meccanismi di interazione tra client e server. Un oggetto COM è dotato di:

Proprietà Insieme di dati pubblici dell'oggetto che possono essere letti e scritti dai dispositivi;

Metodi Definiscono servizi e funzioni implementati;

Eventi Indicano cambiamenti di stato che possono essere usati per invocare metodi.

Comunicazione

- I dispositivi che utilizzano ProfiNET sono programmati utilizzando un file scritto in codice **XML** che ne descrive la configurazione e le interfacce. Il file contiene direttamente le librerie utilizzate ed il software, svincolando in questo modo i dispositivi dalla necessità di un particolare sistema operativo.
- La comunicazione è di tipo **producer/consumer** e può avvenire per cambio di stato, interrogazione ciclica o altri metodi.
- Sono previste quattro modalità di invio dei messaggi:
 - TCP/IP per informazioni di controllo e comunicazioni non critiche;
 - UDP/IP per trasmissioni in tempo reale ma non deterministiche;
 - Un protocollo specifico per le comunicazioni real time e real time isocrone con necessità di garanzia di determinismo con tempi di latenza inferiori rispettivamente a *10ms* e *1ms*. In questo caso è necessario che il protocollo sia implementato su ogni dispositivo coinvolto.

Tutti i tipi di comunicazione vengono implementati sullo stesso mezzo fisico, connesso con topologia a **bus di campo** o ad **anello**: in questo caso è necessaria la presenza di un dispositivo di gestione della ridondanza.

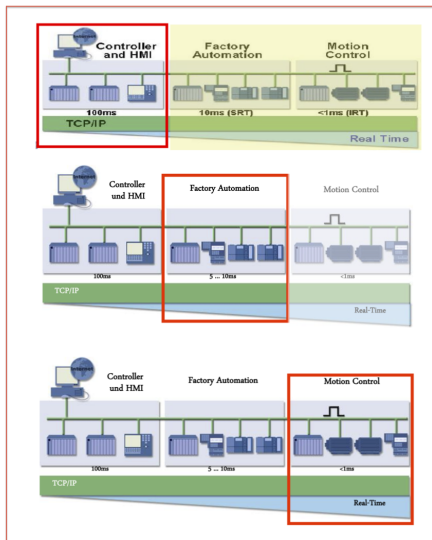


Figura: Livelli di comunicazione non critica, real-time e real-time isocrona [5].

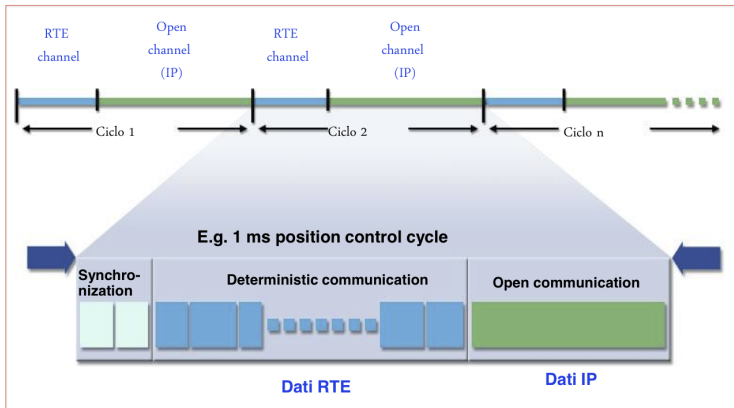


Figura: Ciclo di comunicazione ProfiNET [5].

Ethernet for Control Automation Technology

Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) è un protocollo di comunicazione ai livelli più alti della pila ISO/OSI, basato sullo standard Ethernet e sviluppato per applicazioni di automazione industriale che richiedono comunicazione real-time, ritardi trascurabili e costi bassi a livello hardware.

- I dati EtherCAT sono trasportati direttamente su un frame **Ethernet (IEEE 802.3)** a livello fisico e di data link;
- Nel caso di trasmissione di dati standard, supporta gli standard **IP** al livello di network e **TCP/UDP** al livello di trasporto;
- Nel caso di comunicazione real-time si interfaccia direttamente con il livello di data-link e con quello fisico, per garantire la rapidità della trasmissione;
- Implementa tutti i servizi di interfaccia con l'operatore rendendo lo standard interoperabile.

Topologia

I dispositivi EtherCAT sono generalmente collegati secondo una **topologia logica ad anello**: i dati passano da un device a un altro e ciascuno legge solo le informazioni ad esso indirizzate e lascia passare le altre.

- Supporta varie topologie: lineare, stella, albero, daisy chain e drop lines;
- Possono essere implementate in qualunque combinazione;
- I nodi possono essere distanziati massimo $100m$ l'uno dall'altro con la possibilità di connettere fino a 65535 nodi per ogni segmento EtherCAT;
- Utilizza il cablaggio standard Ethernet, servendosi, come mezzi fisici, del **doppino** o eventualmente della **fibra ottica**.

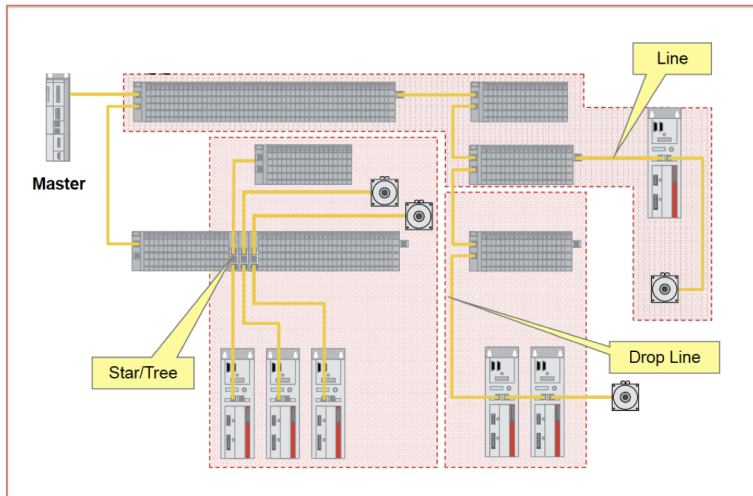


Figura: Topologie tipiche di una rete EtherCAT [2].

Comunicazione

Supporta una comunicazione broadcast e multicast e presenta un'architettura **master/slave** con la possibilità di comunicazione diretta tra slave (**peer-to-peer**) che frequentemente intercorre nei sistemi automatici industriali.

- Un singolo frame può portare diversi datagrammi EtherCAT e la loro sequenza è indipendente dall'ordine fisico dei device;
- La comunicazione è del tipo **on the fly** cioè i dati sono estratti e inseriti durante la trasmissione da un device all'altro;
- Presenta tempi di aggiornamento degli I/O di $30 - 100\mu s$ e un tempo di ciclo di $276\mu s$;
- I telegrammi hanno una lunghezza variabile e si possono estrarre o inserire singoli bit o interi gruppi di byte;
- La dimensione dei dati di processo per slave è praticamente illimitata (da 1 bit a 60kbyte) e possono essere modificati ad ogni ciclo;
- Sono consentite le comunicazioni asincrone ed event triggered;
- Nessun switch è necessario se in rete vi sono solo dispositivi EtherCAT.

Sincronizzazione

La sincronizzazione in ambiente industriale è fondamentale (es. coordinazione simultanea di più assi).

- Il ritardo di ciascun nodo è trascurabile, dovuto al fatto che la trasmissione è **full-duplex**;
- EtherCAT si serve di **clock distribuiti** con un alto grado di tolleranza a errori e ritardi;
- Grazie alla topologia ad anello, il ritardo di propagazione è facilmente determinato così come il valore di offset per ciascuno slave;
- È garantita un'accurata sincronizzazione con tempi $< 1\mu s$.

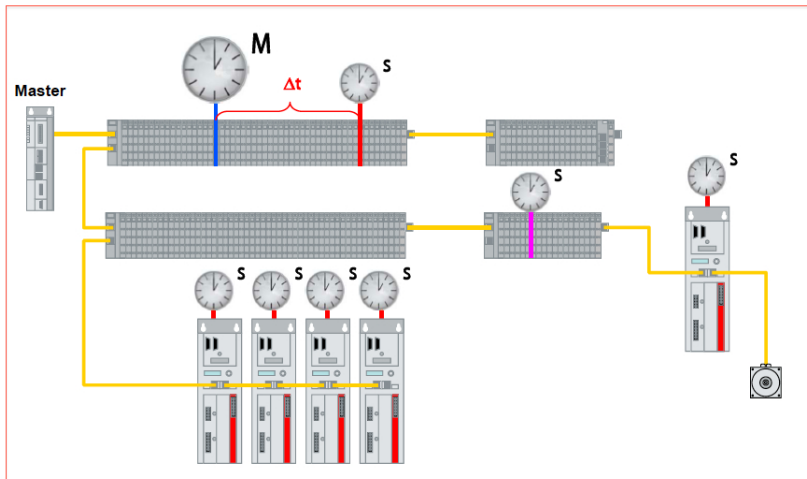


Figura: Clock distribuiti in una rete EtherCAT [2].

Applicazioni e venditori

- Macchine per packaging;
- Presse ad elevata velocità;
- Macchine per iniezione;
- Macchine per la lavorazione del legno;
- Macchine per lavorazione (CNC);
- Banchi di prova;
- Robotica;
- Gestione materiali;
- Acquisizione;
- Logistica.

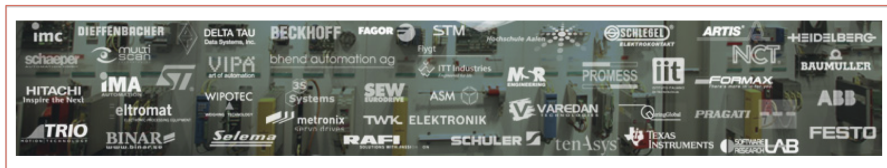


Figura: Principali venditori EtherCAT.

Benefici

- Evita il problema del sovraccarico dei pacchetti mediante l'Indirizzamento;
- Presenta strutture dati del telegramma ottimizzate per gestire l'I/O;
- La comunicazione è realizzata completamente in hardware: massimizzazione delle prestazioni, più deterministiche;
- EtherCAT è la tecnologia più veloce Industrial Ethernet;
- Presenta una topologia flessibile ed è semplice da integrare;
- Presenta servizi di diagnostica;
- Presenta un'implementazione sicura ed economica;
- Garantisce massima interoperabilità con altri protocolli e sul mercato sono disponibili diversi prodotti EtherCAT.

SERCOS-3

SERCOS-3 è la terza generazione del protocollo aperto **SERCOS (IEC-61491)**. Opera ai più alti livelli della pila ISO/OSI e si presta all'utilizzo in applicazioni di comunicazione real-time tipiche di un ambiente industriale.

- SERCOS-3 supporta lo standard **Ethernet** ai primi due livelli della pila ISO/OSI e la comunicazione avviene generalmente su cavi Ethernet **CAT5**;
- Implementa servizi non real-time di controllo, gestione e diagnostica del processo.

Topologia

La topologia di una rete SERCOS-3 è ad **anello** e possono essere implementate strutture gerarchiche sincronizzate e real-time.

- La tipica topologia ad anello elimina la necessità di utilizzare switch o hub per rendere ridondante e veloce la rete;
- Può supportare gli standard **TCP** e **IP** ai livelli di network e trasporto;
- I dispositivi sono collegati in serie con il master all'inizio di una o due linee nel caso il sistema sia ridondante.
- La topologia ad anello offre il vantaggio di un cablaggio ridondante, robusto ai guasti in modo che non si perda né la comunicazione, né la sincronizzazione delle informazioni.
- Eventuali strutture gerarchiche si realizzano connettendo singoli segmenti di rete collegati ad anello, ottenendo una maggiore robustezza nella comunicazione real-time e garantendo la sincronizzazione.
- Un ciclo può variare dai $250\mu s$, per dispositivi veloci, fino a $2ms$, con tempi di riconfigurazione, nel caso di guasti, intorno a $25\mu s$.

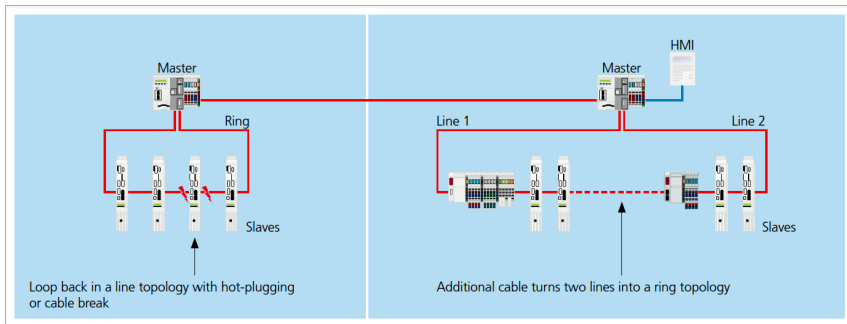


Figura: Topologie tipiche di una rete SERCOS-3 [4].

Comunicazione

In una rete SERCOS-3 tutte le unità sono inserite in un network comune e si adotta la soluzione a **bus universale** ai livelli: **motion, sicurezza e I/O**.

- L'architettura principale è **master/slave (M/S connection)** ma si possono instaurare comunicazione incrociate anche tra periferiche slave (**CC cross communication**);
- Sono previsti diversi servizi per lo scambio di dati real-time (**SVC**), per la trasmissione di dati funzionali (**SMP, SERCOS Messaging Protocol**) o scambio di dati di sicurezza (**SERCOS safety**);
- È possibile gestire l'azionamento di attuatori idraulici, pneumatici ed elettrici oltre che sensori e vari dispositivi di I/O;
- La rete SERCOS-3 prevede inoltre la connessione con alcuni dispositivi non-real-time (**NRT**) come PC o webcam per il controllo da remoto.

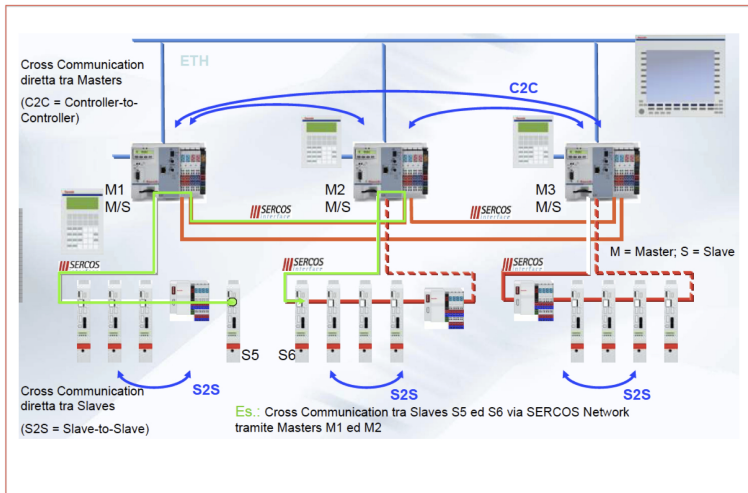


Figura: Livelli di comunicazione di SERCOS-3 [3].

Telegramma

SERCOS-3 utilizza lo standard **802.3 Ethernet** e i telegrammi contengono un header e un campo dati contenuti nel frame Ethernet; le tipologie sono:

Master Data Telegram (MDT) Il master invia dati di comando allo slave.

Acknowledge Telegram (AT) Lo slave invia il proprio status al master e agli altri device.

MDT e AT si suddividono in:

Hot-plug-field Usato per scambiare dati tra slave che sono accoppiati nella rete;

Service-channel-field Usato per scambiare dati aciclici tra master e slave;

Real-time-data-field Usato per implementare una connessione ciclica o aciclica, sincrona e real time tra i vari nodi della rete SERCOS-3.

Gli MDT e gli AT contengono informazioni sui canali di comunicazione e gli slave leggono i dati da questi canali e usano gli stessi per comunicare di nuovo con il master. I telegrammi passano attraverso i vari nodi e vengono processati rapidamente mediante una comunicazione del tipo **on the fly**.

Applicazioni e venditori

- Motion Control;
- Sistemi multi-asse;
- Attuatori idraulici e pneumatici;
- Sensori e dispositivi I/O;
- Robotica;
- Industrial PCs.



Figura: Principali venditori SERCOS-3.

Benefici

- Realizza un sistema altamente ridondante e affidabile;
- Consente una maggiore produttività e consente di ridurre i costi di produzione;
- Consente un'immediata localizzazione degli errori e permette di ridurre i tempi di fermo macchina;
- Garantisce un ottimo **sincronismo** nelle comunicazioni master/slave, master/master e slave/slave;
- La comunicazione con TCP/IP non richiede hardware addizionale;
- La messa in servizio è facile e flessibile dopo la preliminare parametrizzazione dei device;
- È possibile effettuare l'**hot-plugging** degli slave in esercizio in caso di guasti o errori, migliorando l'affidabilità del sistema;
- Garantisce l'**interoperabilità** tra i dispositivi comunicando attraverso indirizzi **MAC** di Ethernet o indirizzi **IP**.

Conclusioni

Industrial Ethernet si presenta come un'ottima soluzione all'automazione nel settore industriale, migliorando diversi aspetti e superando alcuni limiti di Ethernet standard:

- É abbastanza pratico da implementare nelle strutture di basso livello (sensori e attuatori) a differenza della versione standard;
- Risolve in parte, grazie alla comunicazione full-duplex e all'uso di switch, il problema delle collisioni e del determinismo, garantendo, dove richiesto, una comunicazione real-time;
- Non si è vincolati a determinati produttori ma si garantisce l'interoperabilità e la complementarietà delle reti;
- Permette di effettuare controlli da remoto e collegarsi eventualmente a una rete internet o intranet per la gestione dei vari servizi all'interno della fabbrica;
- Basandosi su uno standard diffuso, riduce i costi di preparazione del personale specializzato;
- Permette di ridurre i costi in termini di strumentazione ai livelli più alti di gestione della fabbrica, in cui è già presente una buona base di installato.

Limiti

- La struttura generale delle rete è piuttosto articolata e si ha un'implementazione completa dei livelli ISO/OSI, dei protocolli connessi e delle possibilità di gestione flusso e riscontri;
- Si ha un grande overhead e spreco di banda dovuto anche alla pesantezza dell'incapsulamento dati;
- Bisogna gestire accuratamente le scelte per le necessità di real-time;
- Il completamento della rete industriale con l'introduzione di switch e connettori speciali risulta economicamente oneroso;
- Al momento sono disponibili connettori standard che non incontrano sempre le necessità dell'industria e i prodotti proprietari sono testati per durare infinitamente di più di qualsiasi dispositivo Ethernet in commercio;
- La gestione delle informazioni richiede una maggiore attenzione ai problemi di *security* e all'affidabilità dei dispositivi in commercio.

Industrial Ethernet è quindi una tecnologia promettente ma ancora in fase di sviluppo e maturazione, che necessita di ulteriori miglioramenti prima di essere implementata in maniera massiccia e completa nel settore industriale.

Limiti

- La struttura generale delle rete è piuttosto articolata e si ha un'implementazione completa dei livelli ISO/OSI, dei protocolli connessi e delle possibilità di gestione flusso e riscontri;
- Si ha un grande overhead e spreco di banda dovuto anche alla pesantezza dell'incapsulamento dati;
- Bisogna gestire accuratamente le scelte per le necessità di real-time;
- Il completamento della rete industriale con l'introduzione di switch e connettori speciali risulta economicamente oneroso;
- Al momento sono disponibili connettori standard che non incontrano sempre le necessità dell'industria e i prodotti proprietari sono testati per durare infinitamente di più di qualsiasi dispositivo Ethernet in commercio;
- La gestione delle informazioni richiede una maggiore attenzione ai problemi di *security* e all'affidabilità dei dispositivi in commercio.

Industrial Ethernet è quindi una tecnologia promettente ma ancora in fase di sviluppo e maturazione, che necessita di ulteriori miglioramenti prima di essere implementata in maniera massiccia e completa nel settore industriale.

Grazie per l'attenzione

Riferimenti bibliografici



Stefano Cazzani.

Industrial Ethernet: Teoria, prodotti e applicazioni.

Le Monografie, vol.1, gen. 2009.



EtherCAT Technology Group Headquarters.

EtherCAT.

EtherCAT Technology Group, gen. 2010.



Michele Pirelli.

SERCOS III Comunicazione real time su base Ethernet quale bus universale per l'Automazione Industriale.

Bosch Rexroth AG, Gruppo Azionamenti Elettrici, jun. 2010.



SERCOS International e.V..

SERCOS III, Universal Real-Time Communication with Ethernet.

SERCOS Interface, International member companies, gen. 2010.



Stefano Panzieri.

ProfiNET, the automation standard.

Università degli Studi di Roma, Roma Tre, Reti e sistemi per l'automazione, gen. 2010.



Stefano Panzieri.

Ethernet Industriale.

Università degli Studi di Roma, Roma Tre, Reti e sistemi per l'automazione, gen. 2010.



Ann Arbor.

Common Industrial Protocol (CIP).

ODVA, Inc., gen. 2006.



Ann Arbor.

Ethernet/IP, Quick Start for Vendors Handbook.

ODVA, Inc., gen. 2008.



Sebastian Lammermann.

Ethernet as a Real-Time Technology.

University of Telecommunications, Leipzig, gen. 2010.



CISCO.

Industrial Ethernet: A Control Engineer's Guide.

Cisco and/or its affiliates, gen. 2010.



Pier Luca Montessoro.

Reti di calcolatori e applicazioni telematiche.

Università degli Studi di Udine, Facoltà di Ingegneria, gen. 1999.



Reiner Grubmeyer, Stephan Rupp.

Ethernet-based fieldbuses for industrial networks: the basics.

Industrial Ethernet Book, Published by IEB Media GbR, gen. 2011.



CISCO.

Internet Protocol.

Internetworking Technology Overview, jun. 1999.



Luca Veltri.

Internet Protocol.

Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, gen. 2011.



Roberto Alfieri, Marco Borrini e Roberto Covati.

Transmission Control Protocol.

Università degli Studi di Parma, Dip. di Fisica, Lab. di calcolo avanzato, gen. 2011.