

Corso di Laurea Magistrale di Ingegneria Elettrica

Corso di Sistemi e componenti per l'automazione

Corso di Automazione e comunicazione dei sistemi industriali

AA 2014-15

Bus di campo per l'automazione

Francesco Benzi

Dipartimento di Ingegneria Elettrica

Università di Pavia

**Versione in fase di revisione e sistemazione.
Non pubblicare o diffondere senza questo avviso.**

Il bus di campo o Fieldbus

È una **rete industriale di comunicazione** per il controllo distribuito in tempo reale, che opera al livello di base della piramide dell'automazione in fabbrica (CIM) per **coordinare e collegare tra loro i dispositivi di campo** (azionamenti, attuatori, sensori) e **interagisce con i livelli superiori della stessa.**

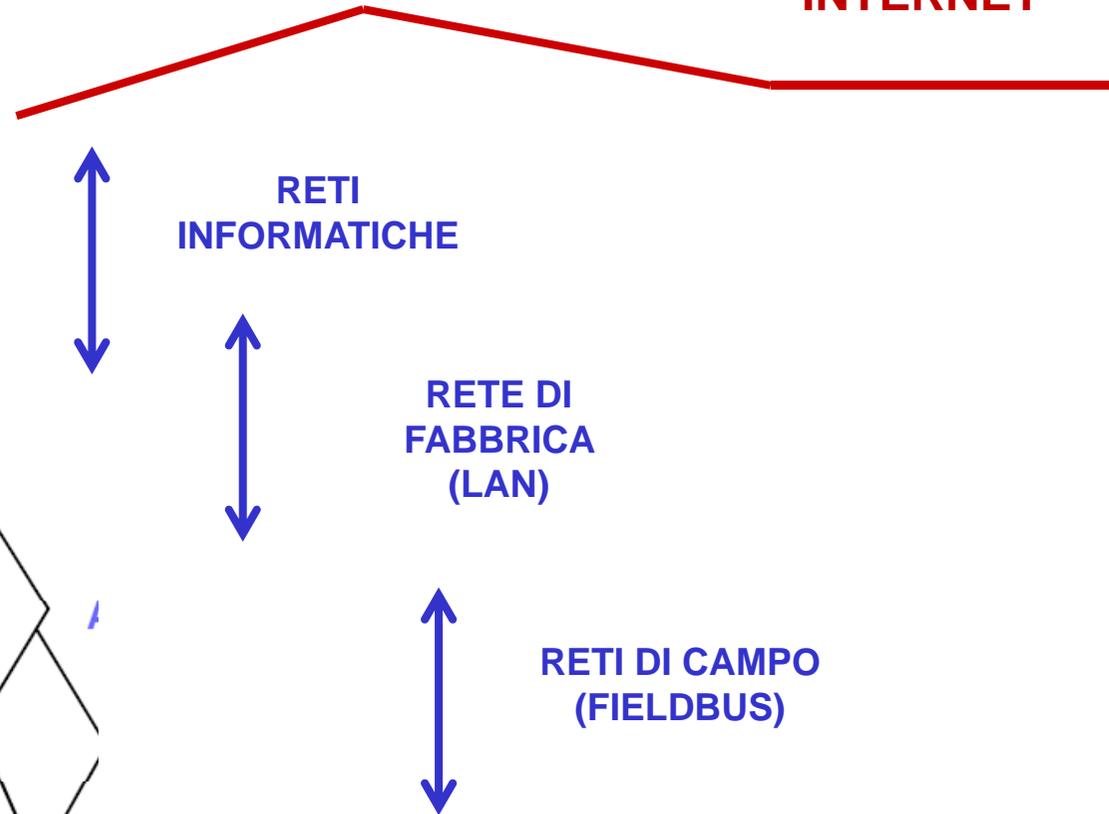
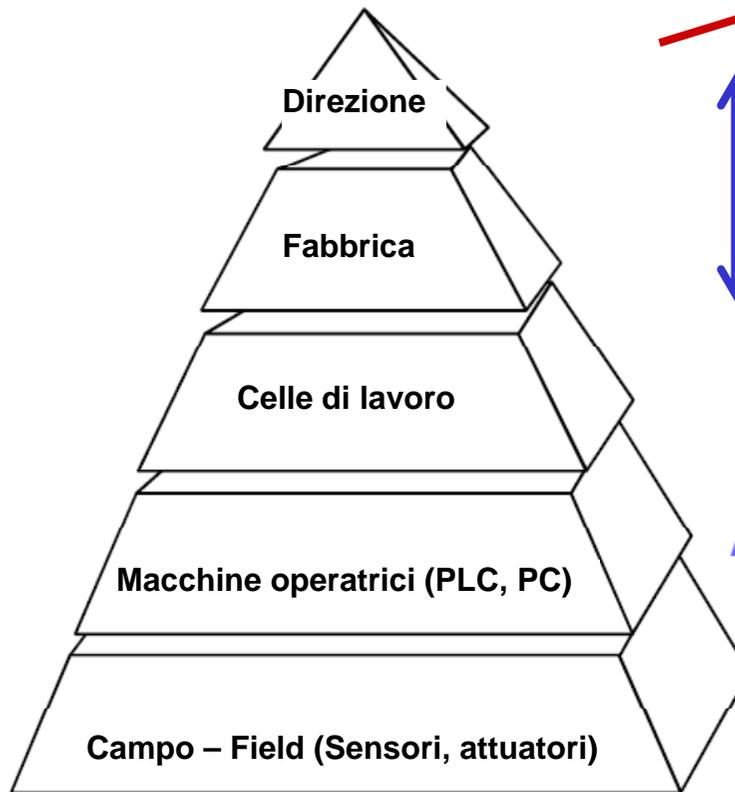
Realizza un'architettura **multipunto** in cui ogni dispositivo o nodo interessato allo scambio di dati è collegato ad un'unica linea di comunicazione (fisica o logica) che costituisce il tramite della distribuzione e raccolta delle informazioni.

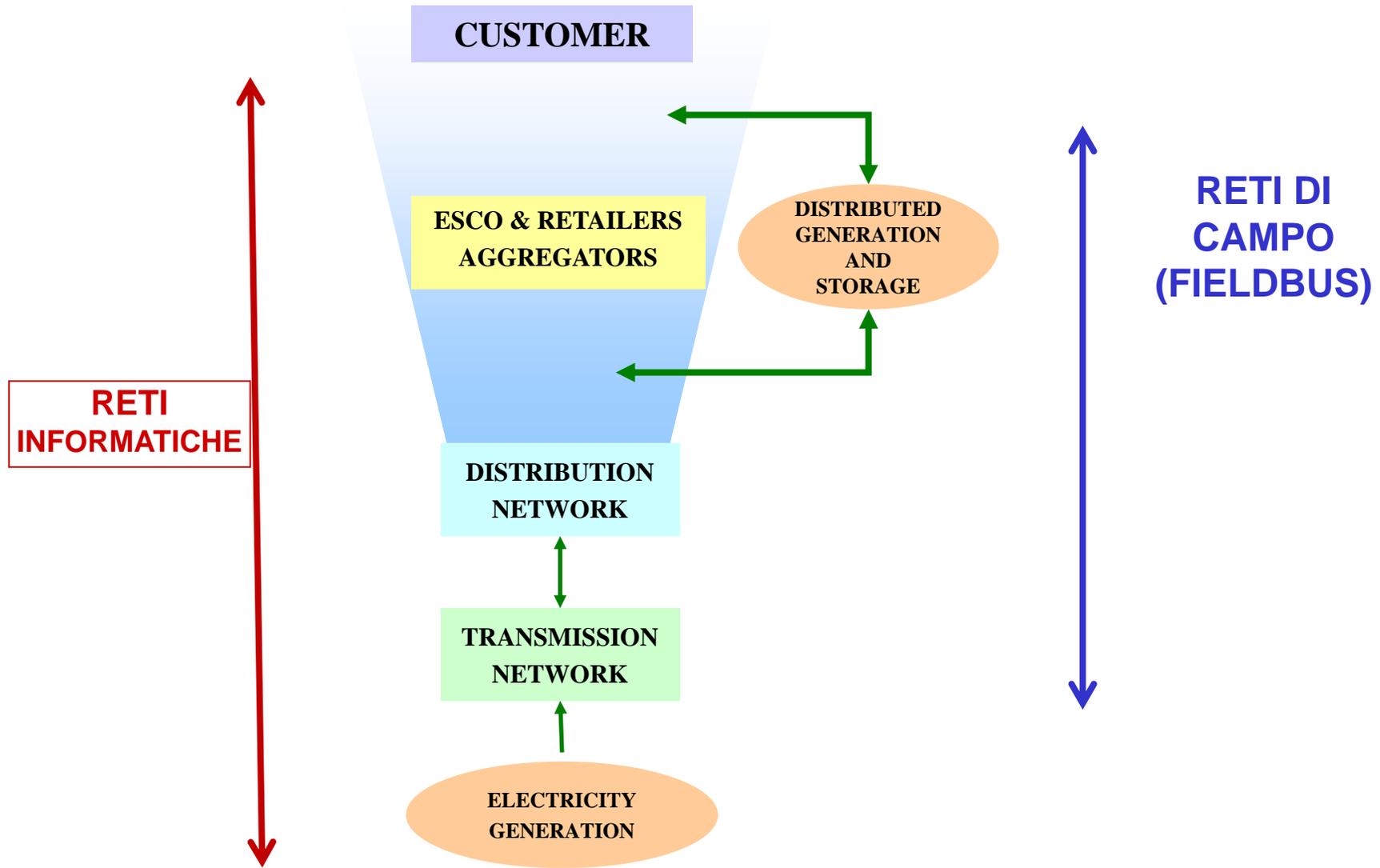
La comunicazione avviene in forma **digitale, seriale e ad elevata velocità** per servire tutti i nodi interessati nei tempi richiesti.

La piramide CIM

Reti di comunicazione

INTERNET





Il bus di campo o Fieldbus

Elementi caratteristici di un Bus di campo

- Il mezzo fisico di trasmissione e la modalità di codifica del segnale
- La topologia e l'architettura della rete di comunicazione
- Il protocollo di comunicazione

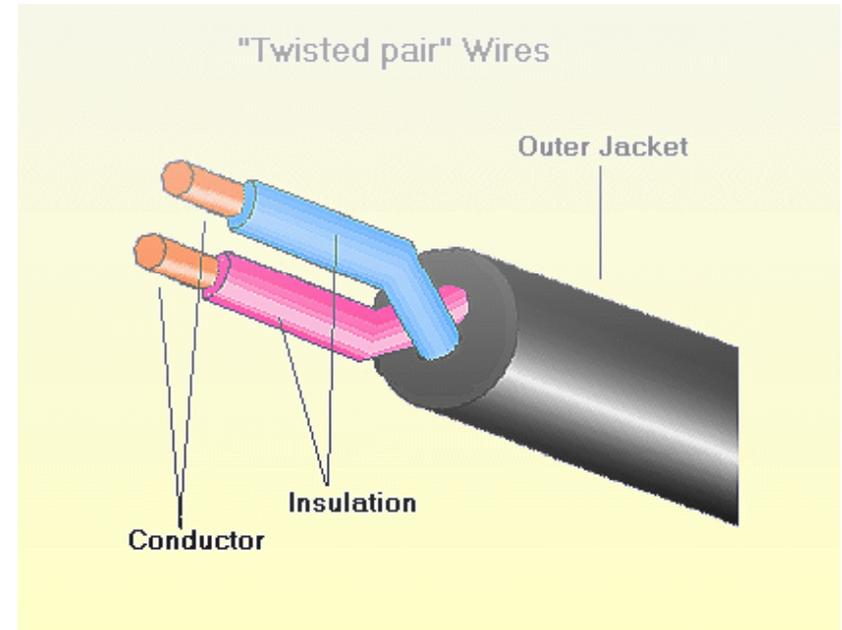
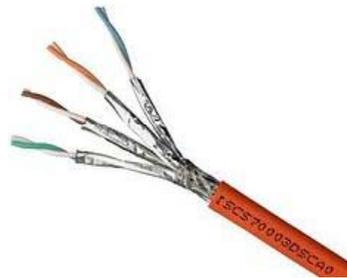
Diversi campi applicativi dei Bus di campo

- Bus di campo per l'automazione industriale
- Bus di campo per l'automazione degli edifici
- Bus di campo per il telecontrollo

Sistemi fisici di trasmissione

Doppino in rame

Conduttori in rame intrecciati (twisted) schermati (STP, Shielded Twisted Pair), o non schermati (UTP, Unshielded Twisted Pair)



- Categorie in uso per velocità elevate:

ANSI/EIA/TIA Cat. 3, 4, 5 e 5e

ISO/IEC - EN Classi A, B, C, D

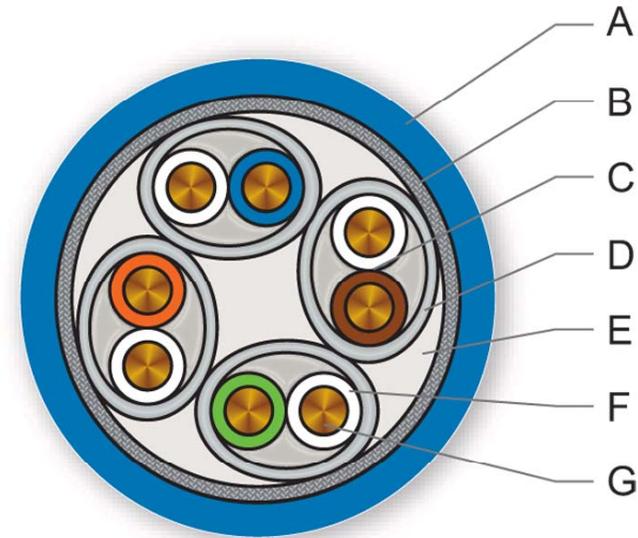
- Categorìa 6 – Classe E **fino a 250 MHz**

fino a 100 MHz

Sistemi fisici di trasmissione

Doppino in rame

• **Categoria 7, 7a, 7b – Classe F** Banda larga (fino a 1,5 GHz – 10-100 Gb/s)



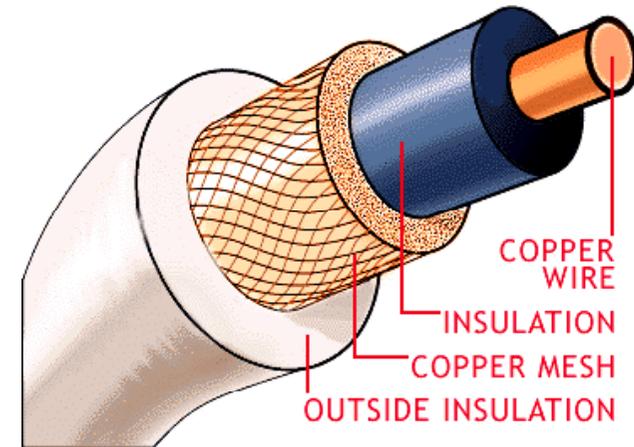
• **Categoria 8** (fino a 1,2 GHz e fino a 40 Gbps– in corso di sperimentazione)

Utilizzo di un cavo a 4 coppie e di un connettore RJ45. Garantire la retro-compatibilità e salvaguardare gli attuali investimenti in macchine da 10 Gbps - <http://www.commscope.com/>

Sistemi fisici di trasmissione

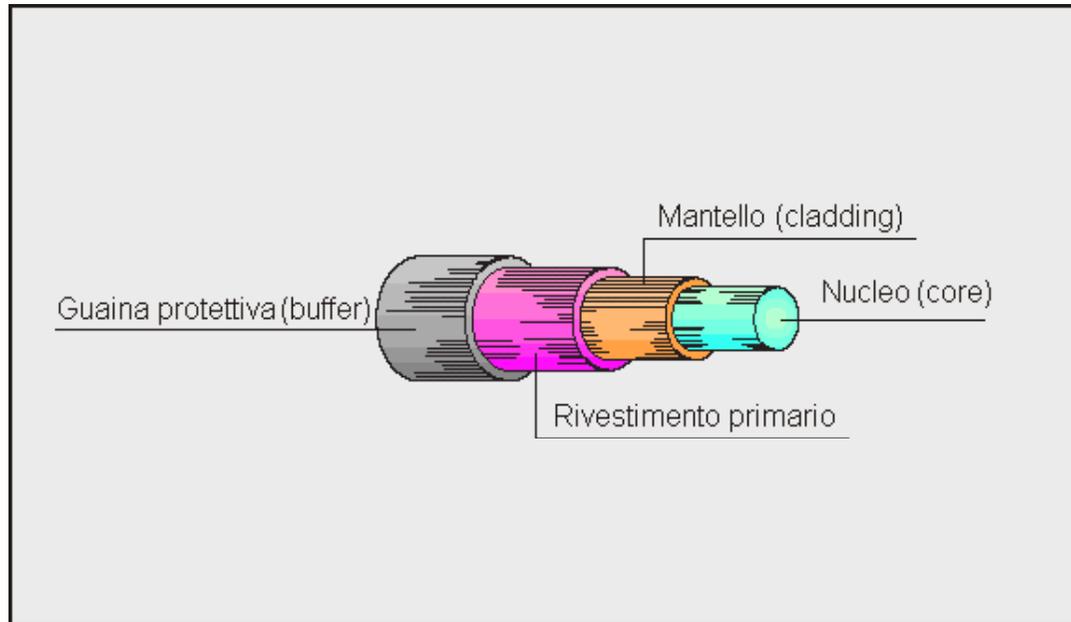
Cavo coassiale

- Trasmissione video analogica RG59/U
- Trasmissione dati e video digitale: RG6/U o RG11/U
- fino a 10 Mbit/s per distanze fino a 10 km



Sistemi fisici di trasmissione

Fibra ottica



- un nucleo in vetro purissimo,
- un mantello di materiale ottico per la riflessione
- rivestimento di plastica di protezione

–Trasmissione fino a 2,5 Gbps

–Impiegata nell'audio-video e in campo industriale quando sono richieste

prestazioni elevate:

es. gestione di reti veloci ed estese, azionamenti molto veloci e precisi,

Sistemi fisici di trasmissione

Onde convogliate (Powerline)

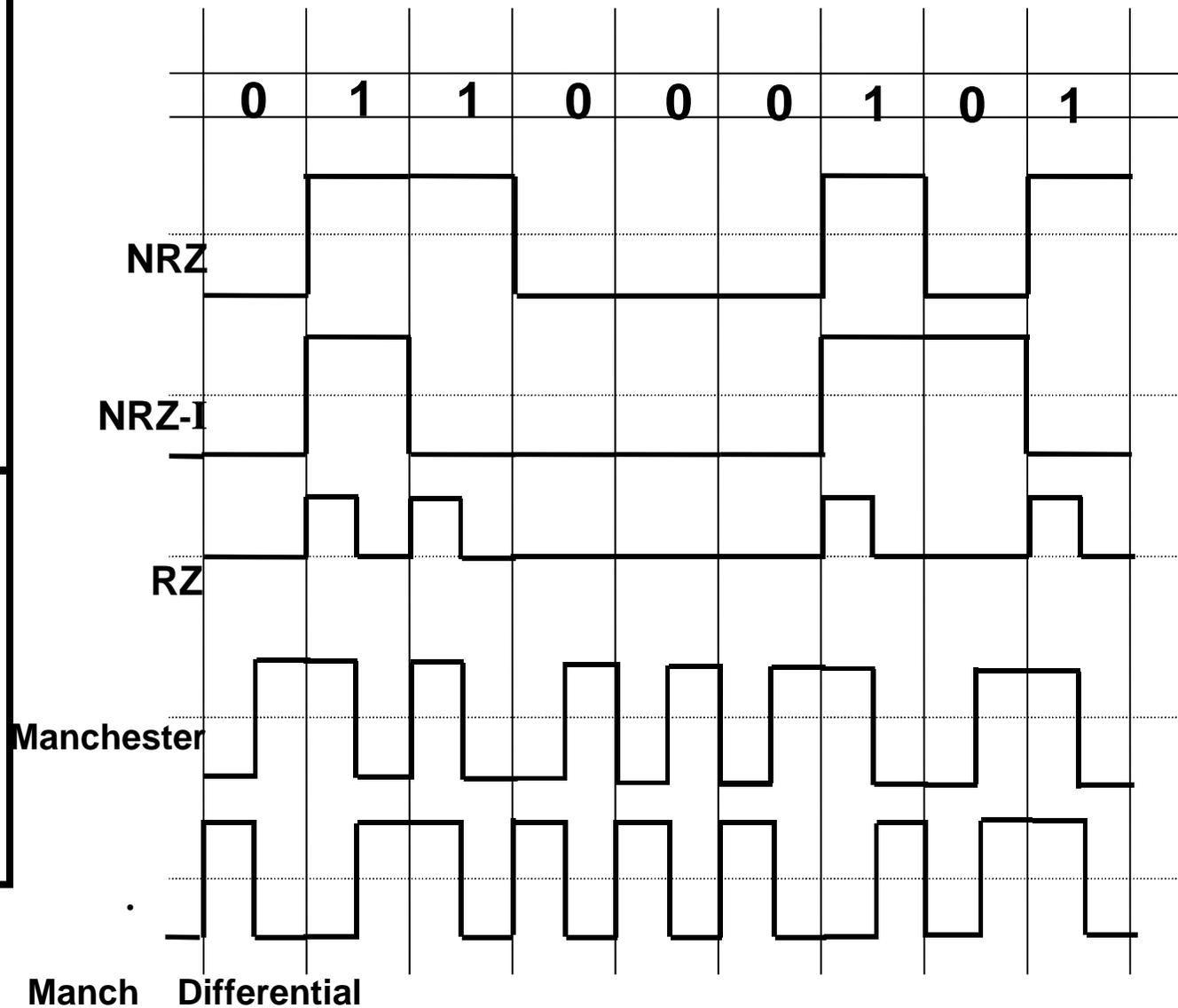
- Utilizzano le linee di bassa potenza (230-400 V) per trasmettere un segnale modulato in frequenza
- Si raggiungono velocità di qualche centinaio di kbps
- Disturbi sulla rete

Trasmissione senza fili (Wireless)

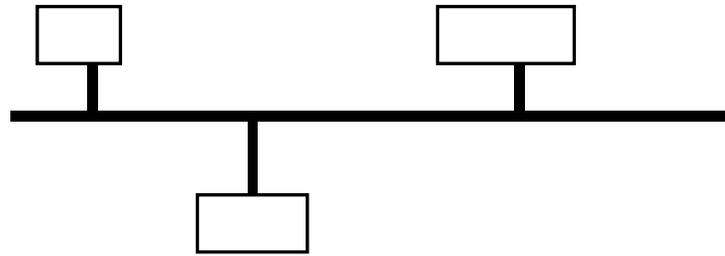
- Utilizzano frequenze infrarosso e in campo industriale radiofrequenza
- Non richiedono cablaggio
- Si raggiungono velocità di qualche Mbps
- Problemi di interferenza

La codifica dei dati

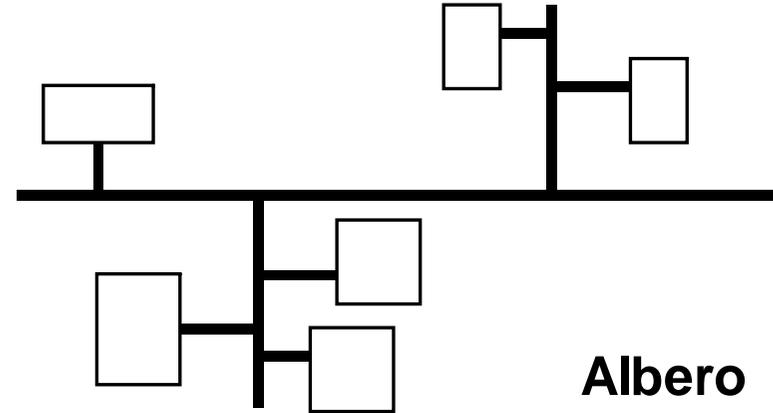
Codifica di stato	
1	→ 10V
0	→ 0V
Codifica di transizione	
1	→ da 10V a 0V
0	→ da 0V a 10V



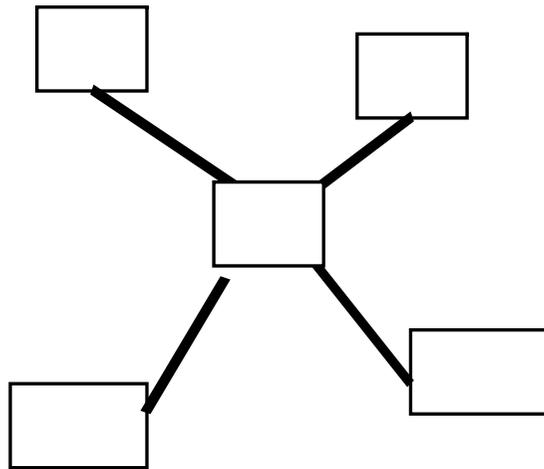
Topologia della rete



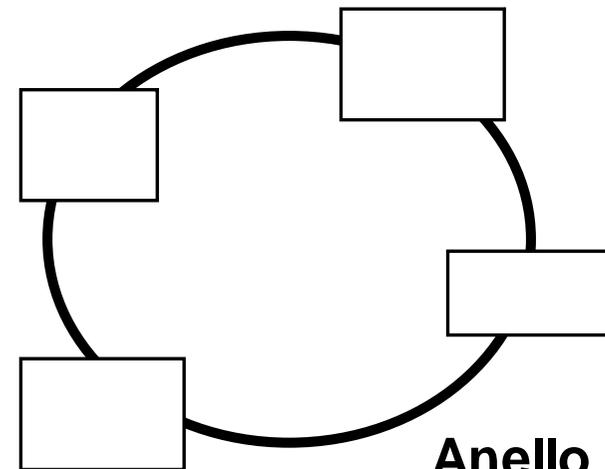
Bus



Albero



Stella



Anello

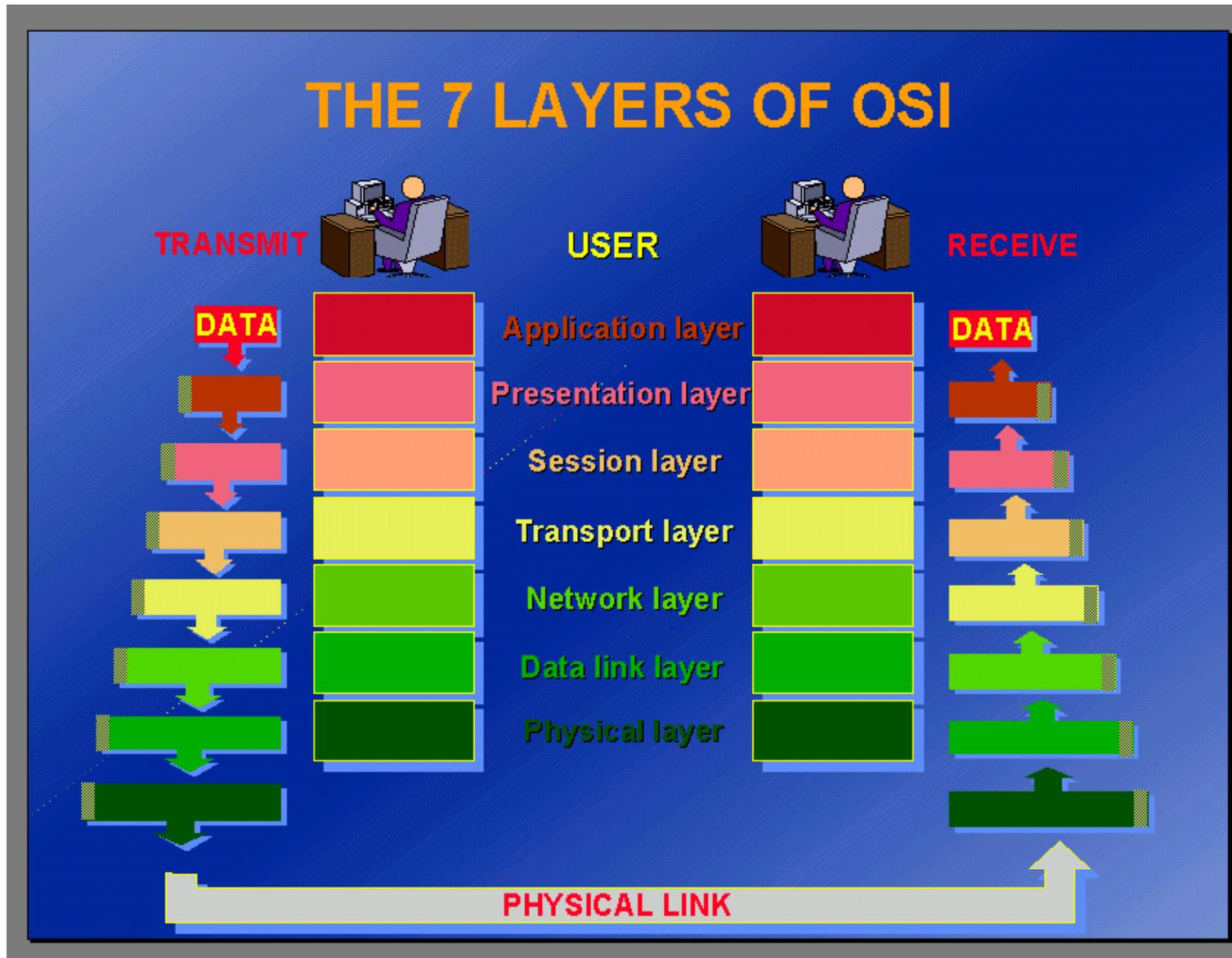
Protocolli di comunicazione

Un **PROTOCOLLO DI COMUNICAZIONE** è un **insieme di regole e comportamenti** che due dispositivi distinti debbono rispettare per scambiare informazioni tra loro.

Lo scambio di informazioni è in generale un'operazione che coinvolge più fasi intermedie (**LIVELLI**), ciascuna delle quali è regolata da un proprio protocollo.

ISO ha standardizzato un **MODELLO DI RIFERIMENTO** per lo sviluppo di protocolli orientati all'**INTERCONNESSIONE DI SISTEMI APERTI** (**Modello ISO-OSI International Standard Organisation – Open System Interconnection**).

Comunicazione attraverso i livelli ISO-OSI



Versione in fase di revisione e sistemazione. Non pubblicare o diffondere senza questo avviso.

I livelli ISO-OSI **1. Livello fisico (Physical)**

Trasmette le sequenze binarie sul canale di comunicazione

Specifica le caratteristiche del **mezzo trasmissivo**

- Tipo di collegamento (seriale/parallelo)
- Tipo di mezzo (rame, fibra ottica, onde convogliate,...)
- Codifica dei segnali
- Velocità di trasmissione
- Forma e caratteristiche meccaniche/elettriche

A questo livello operano se necessario **ripetitori di segnale**, che amplificano il segnale da trasmettere a distanze elevate

I livelli ISO-OSI **2. Collegamento dati (Data Link)**

Gestisce e organizza i dati destinati al livello fisico

- Accetta ed esegue le richieste di trasmissione dall'alto
- Riporta al livello superiore lo stato della trasmissione
- Attiva, controlla e disattiva l'accesso al mezzo fisico
- Rivela errori di sincronizzazione nei dati provenienti dal mezzo fisico
- Riconosce gli indirizzamenti a una determinata stazione
- Inserisce e riconosce le codifiche aggiunte per il rilevamento degli errori (Frame Check Sequence)

I livelli ISO-OSI **2. Collegamento dati (Data Link)**

È suddiviso in due sottolivelli

Logical Link Control (LLC): servizi di collegamento col livello superiore

Medium Access Control: gestisce l'accesso al mezzo delle diverse unità

I bridge sono dispositivi che lavorano a questo livello

Permettono l'interconnessione di reti che usano lo stesso protocollo, ma mezzi trasmissivi diversi, filtrando e adattando i segnali.

I livelli ISO-OSI **3. Livello di rete (Network)**

È responsabile dell'instradamento dati sulle reti

- Sceglie il miglior percorso per i dati (**routing**)
- Stabilisce i collegamenti **reali** (connessione fissa) o **virtuali** (pacchetti inviati separatamente)
- Mantiene i database dei nodi utilizzabili per il routing
- I **router** sono dispositivi per connettere reti con protocolli diversi a livello fisico o di collegamento

I livelli ISO-OSI **4. Livello di trasporto (Transport)**

Frammenta e riassembla i pacchetti di dati provenienti dai livelli contigui, ne controlla la completezza e ne ottimizza la spedizione. Es. TCP UDP

I livelli ISO-OSI **5. Livello di sessione (Session)**

È responsabile del dialogo (mono/bidirezionale) fra due programmi applicativi e dei diritti di accesso a risorse condivise.

Controlla i parametri della connessione: lato trasmettitore, momento della trasmissione, durata, ecc...

I livelli ISO-OSI **6. Livello presentazione (Presentation)**

Determina il formato utilizzato per lo scambio dei dati tra i computer sulla rete

Gestisce la **sintassi** dell'informazione da trasferire (codifica ASCII o EBCDIC) , le modalità di **crittografia** e **compressione**

I livelli ISO-OSI **7. Livello applicazione (Application)**

È responsabile dei programmi applicativi, attraverso cui l'utente utilizza la rete

- Lettura/scrittura remota (**FTAM, TELNET**)
- Trasferimento di file (**FTP**)
- Posta elettronica (**SMTP**)
- Trasmissione di documenti (**HTTP**)

Si interfaccia direttamente con l'utente, offrendogli gli strumenti di accesso alla rete

Gli altri livelli sono **trasparenti all'utente**

I livelli ISO-OSI

Ogni livello è responsabile di un definito insieme di funzioni (codifica, frammentazione, instradamento,...) e utilizza per questo determinate **entità (blocchi funzionali)**

Ogni entità è in grado di interpretare solo entità dello stesso livello, anche di stazioni diverse

Nel passaggio di pacchetti di dati da un livello a quello inferiore si aggiungono informazioni che servono a identificarlo: **Protocol Data Unit (PDU)**

Ogni livello aggiunge alle informazioni ricevute dall'alto la propria PDU e la rimuove se il passaggio è inverso.
Tecnica di incapsulamento

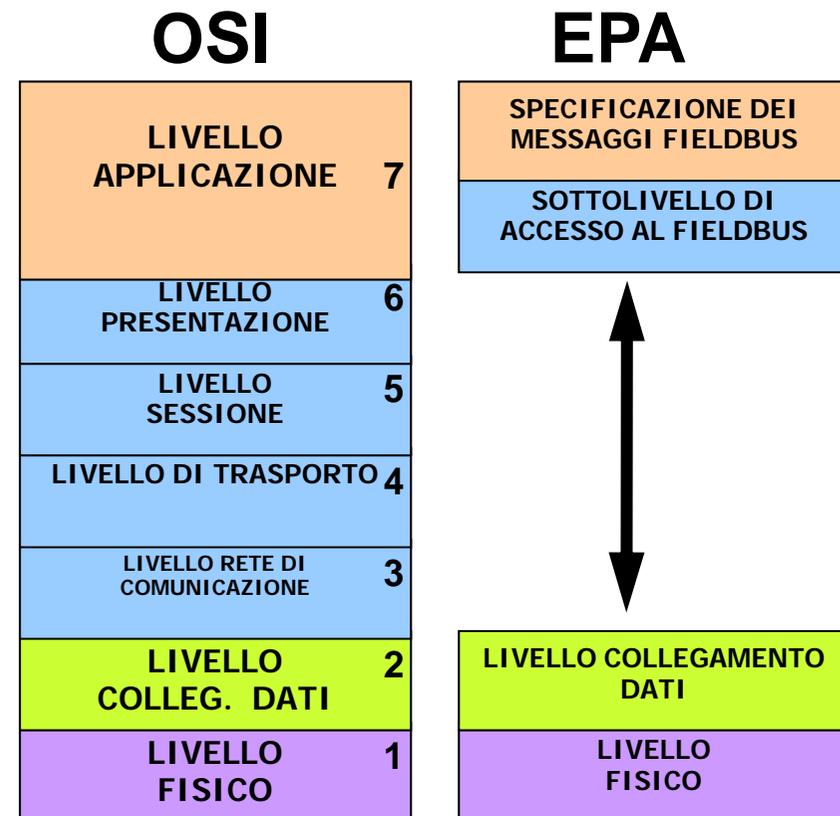
Modello OSI e Modello EPA

Il modello OSI è di tipo generale, utilizzabile per l'interconnessione di qualunque sistema informatico

Le operazioni richieste sono numerose e complesse e possono rallentare la trasmissione

Per dispositivi specifici (es. a livello di campo azionamenti, sensori, ecc) il tipo di dato e la sua trasmissione sono standard.

Si usa un **modello ridotto EPA (Enhanced Performance Architecture)**



Bus di campo - Fieldbus

- Lo schema OSI, specificato ai livelli 7, 2 e 1
- **I tentativi di standardizzazione**

IEC61158

- ▶ Standard IEC 61158-3
- ▶ ControlNet
- ▶ PROFIBUS
- ▶ P-NET
- ▶ Fieldbus Foundation-
(High Speed Ethernet)
- ▶ SwiftNet
- ▶ WorldFip
- ▶ Interbus

EN 50170

- ▶ PROFIBUS
- ▶ WorldFip
- ▶ P-NET
- ▶ Fieldbus Foundation
- ▶ ControlNet

Modalità di accesso al bus

L'accesso al bus di più dispositivi è regolato al Livello 2, dal **MAC (Medium Access Control)**

Garantisce una trasmissione ordinata e comprensibile senza sovrapposizioni

Garantisce che la trasmissione avvenga nei tempi e negli intervalli stabiliti (Determinismo)

Tipologie di accesso al bus:

- Controllo di accesso **centralizzato**
- Controllo di accesso **distribuito**
- Controllo su accesso **multiplo**

Accesso centralizzato – Master/Slave

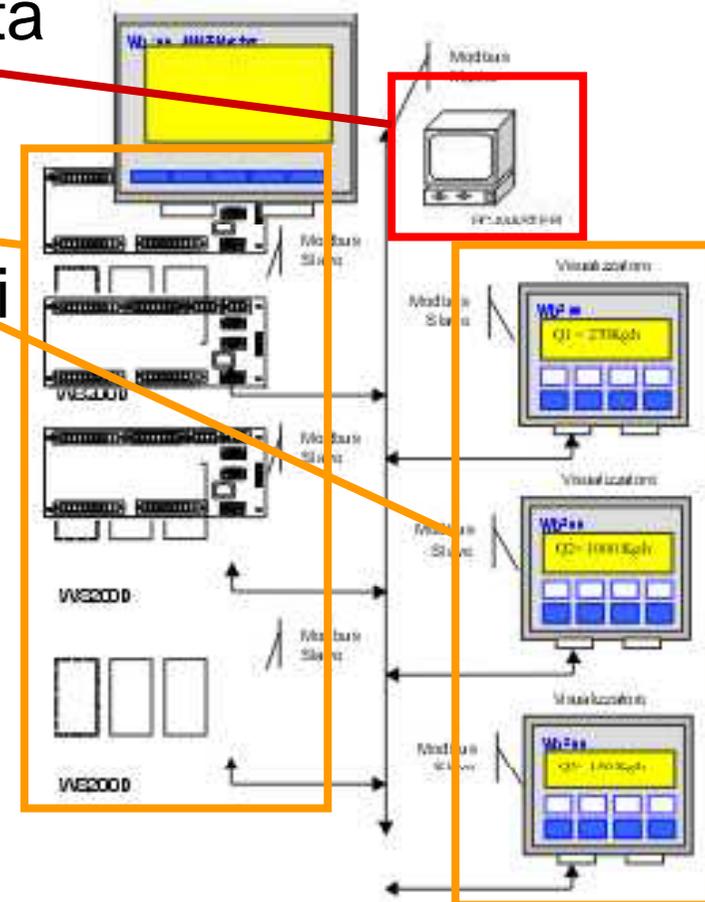
Un'unica stazione **master** autorizzata a trasmettere spontaneamente

Le stazioni **slave** possono rispondere o chiedere il permesso di trasmettere

L'interrogazione avviene periodicamente (**polling**) o secondo una lista modificata dinamicamente

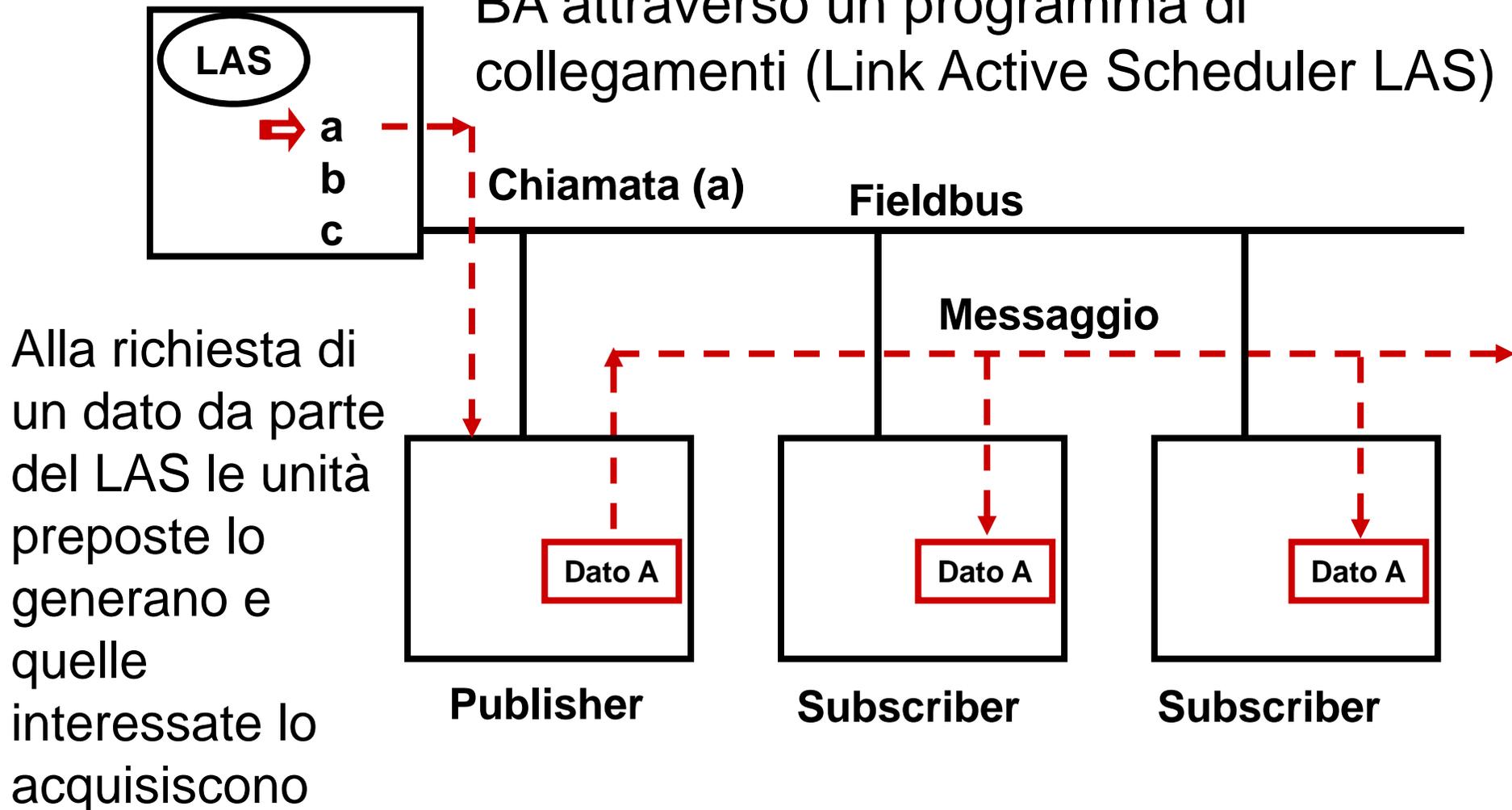
Le stazioni interrogate rispondono o chiedono altri dati

Possibilità di controllare in modo **deterministico** il traffico sulla rete, a spese di maggiore lentezza delle procedure

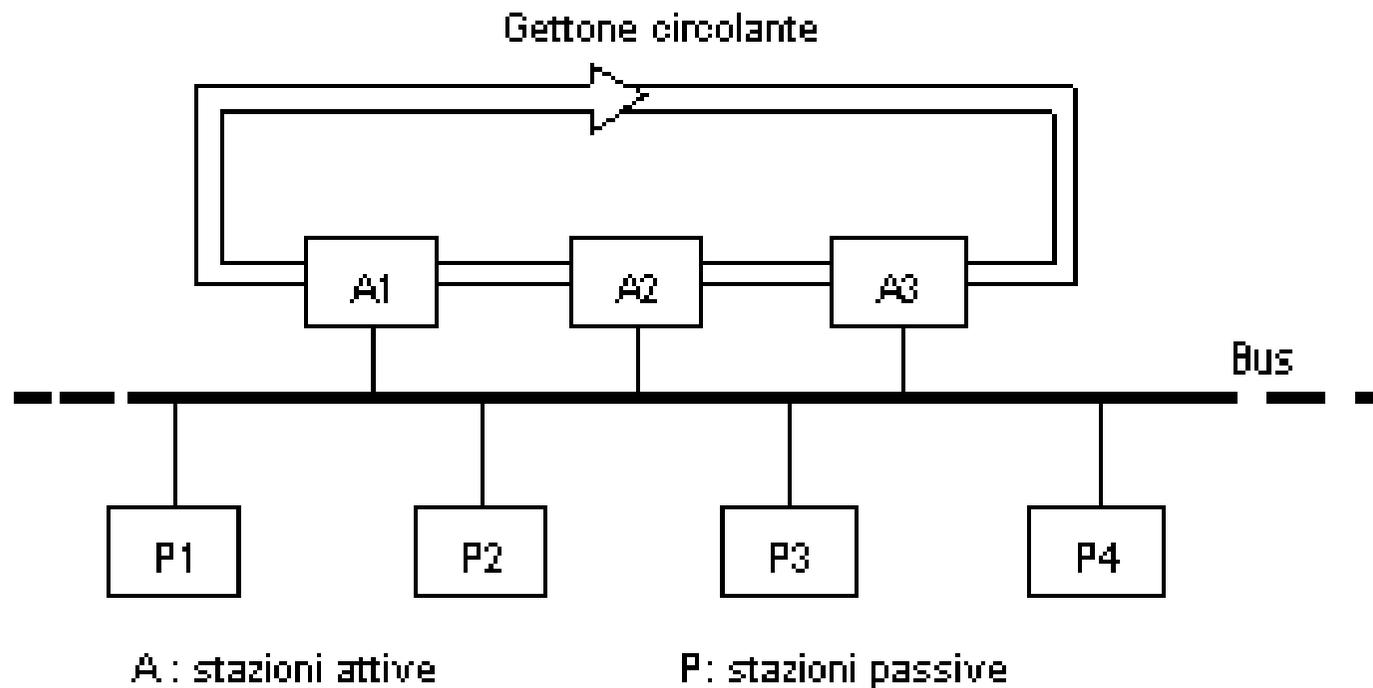


Accesso centralizzato – Arbitro del bus

Il bus è gestito da un arbitro (Bus Arbiter) BA attraverso un programma di collegamenti (Link Active Scheduler LAS)



SCHEMA PROFIBUS



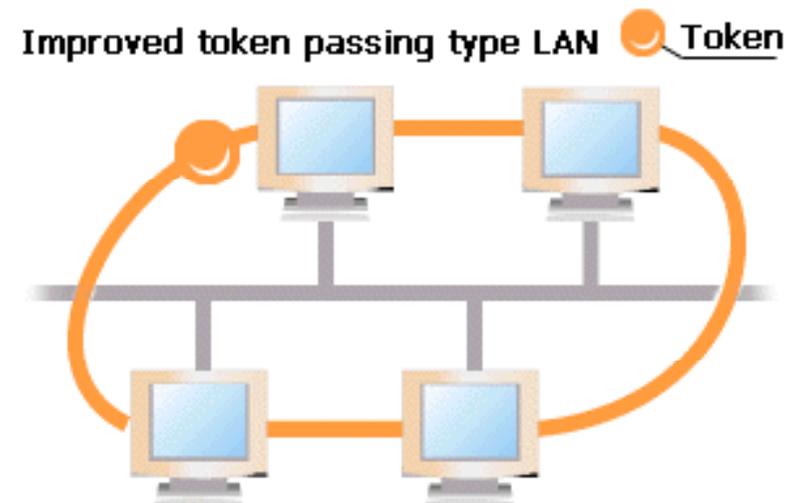
Accesso distribuito – **Token passing**

È definito un oggetto di comunicazione (**token o gettone**, una stringa di dati) che abilita la stazione che ne è in possesso a operare da master per una durata di tempo massimo

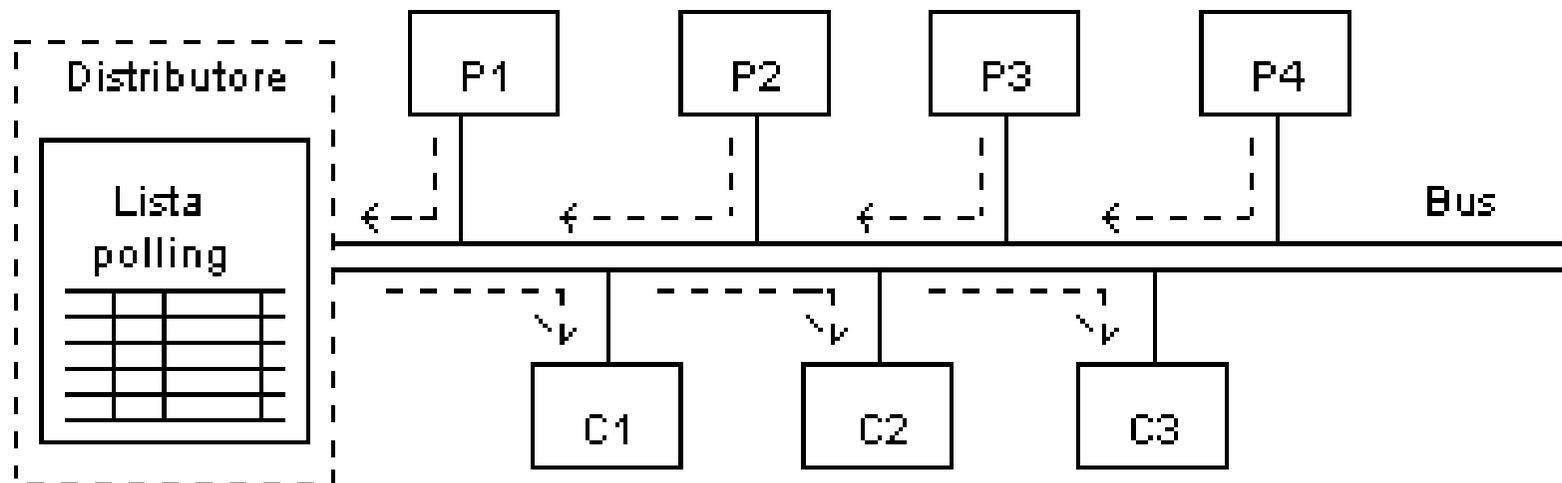
Al termine prefissato la stazione trasmette il gettone a una successiva secondo un ordine prestabilito

Si stabilisce di fatto una rete ad anello

- **Time Locked Token Rotation**
- **Free Running Token Rotation**



SCHEMA WORLDVIP



P: nodi produttori di dati

C: nodi consumatori di dati

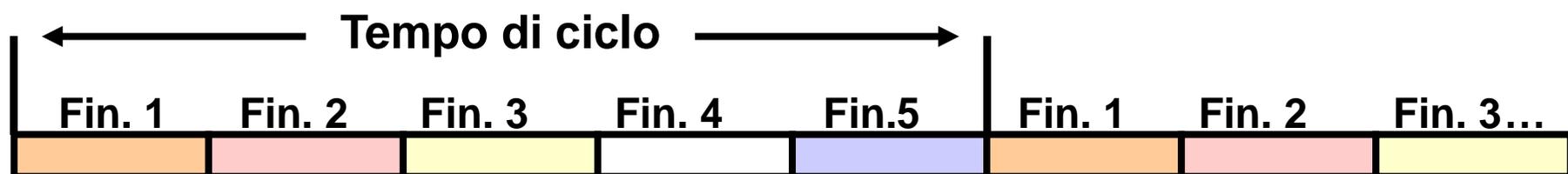
Accesso distribuito – TDMA

Time Division Multiplexed Access

È definito un tempo di ciclo entro il quale tutte le stazioni devono avere la possibilità di comunicare

Ogni ciclo è suddiviso in finestre temporali riservate ad ogni stazione abilitata, durante il quale ciascuna opera da master

Ogni stazione si auto-elegge come master al momento stabilito, utilizzando un **clock interno sincrono a quello del bus**



È garantito il determinismo delle operazioni

Versione in fase di revisione e sistemazione. Non pubblicare o diffondere senza questo avviso.

Accesso multiplo – Carrier Sensing Multiple Access

Tutti i nodi attivi hanno il diritto di trasmettere sulla rete

Ogni nodo è normalmente in ascolto (**Carrier Sensing**)

Se il mezzo è libero i nodi possono iniziare la trasmissione

Se più nodi trasmettono contemporaneamente si verifica una **collisione**

Accesso multiplo – Carrier Sensing Multiple Access

Cosa fare in caso di COLLISIONE?

Collision Detection (CSMA/CD)

Le stazioni verificano l'avvenuta collisione, annullano il messaggio e lo rimandano dopo un tempo casuale

Collision Avoidance (CSMA/CA)

La stazione invia un segnale di avviso alle altre stazioni chiedendo di non trasmettere e quindi invia il segnale.

Collision Resolution (CSMA/CR)

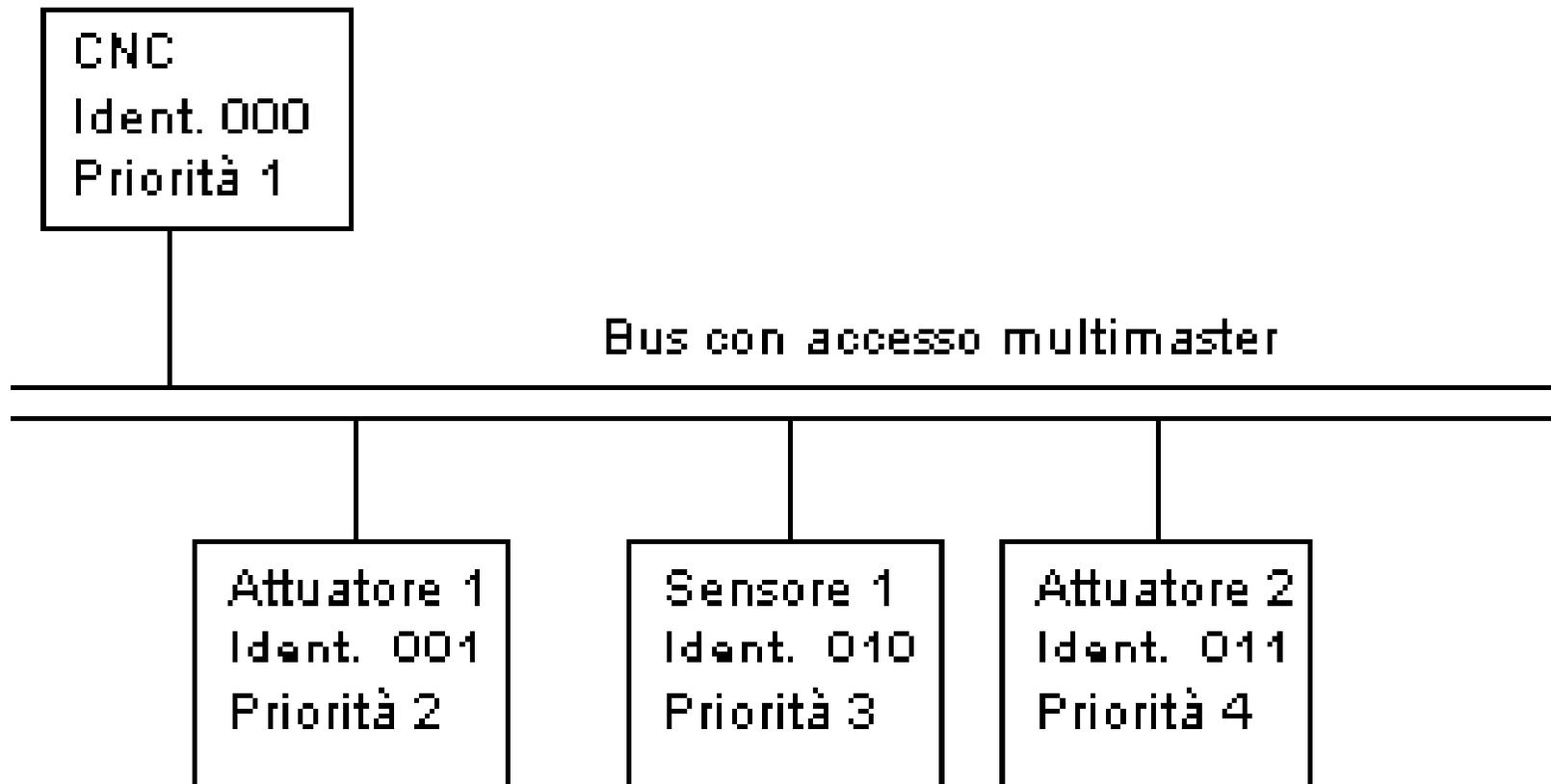
Le stazioni trasmettono in base a livelli di priorità stabiliti a priori. I tempi di attesa in caso di collisione dipendono dalla priorità

Bit Arbitration (CSMA/BA)

Le stazioni sono identificate da un codice binario in ordine di priorità. In caso di collisione il messaggio prioritario, caratterizzato da un bit dominante, può continuare la trasmissione. Gli altri sono rinviati.

La probabilità di collisione dipende dal traffico sul bus

SCHEMA CAN



Ethernet

- È un **protocollo di comunicazione** dedicato allo scambio di dati tra computer in una rete locale (LAN).
- **Supporti fisici**: cavo coassiale, doppino di rame, fibre ottiche. Velocità: 10 Mbps su doppino.
- Versioni più veloci, 100 Mbps, di grande interesse anche a livello industriale. **Fast Ethernet** . (Verso i Gigabps.)
- Specifica solo i livelli inferiori dello schema ISO/OSI.
- Su di esso si affacciano tutti i dispositivi e le tecnologie legate a **Internet** attraverso i **protocolli TCP/IP**.

Servizi di comunicazione



Servizi non connessi:

- Messaggi autodescrittivi
- Utile per applicazioni che richiedono raramente di accedere alle informazioni remote
- Non richiede il lavoro di configurazione della rete

Servizi connessi:

- Identificativo di connessione all'inizio del messaggio
- Frame efficiency maggiore
- Adatti per applicazioni di automazione per scambio ciclico di molti dati

Tecnica di indirizzamento

UNO a UNO
(Peer to Peer)
Source-destination

C'è l'identificativo del mittente e del destinatario nel PDU del Data Link

UNO a MOLTI
Group addressing
o multicasting

Identificativo del mittente e del gruppo di destinazione a cui è associata una funzione

E' garantita la consistenza fisica: il messaggio trasmesso è lo stesso per tutti i destinatari

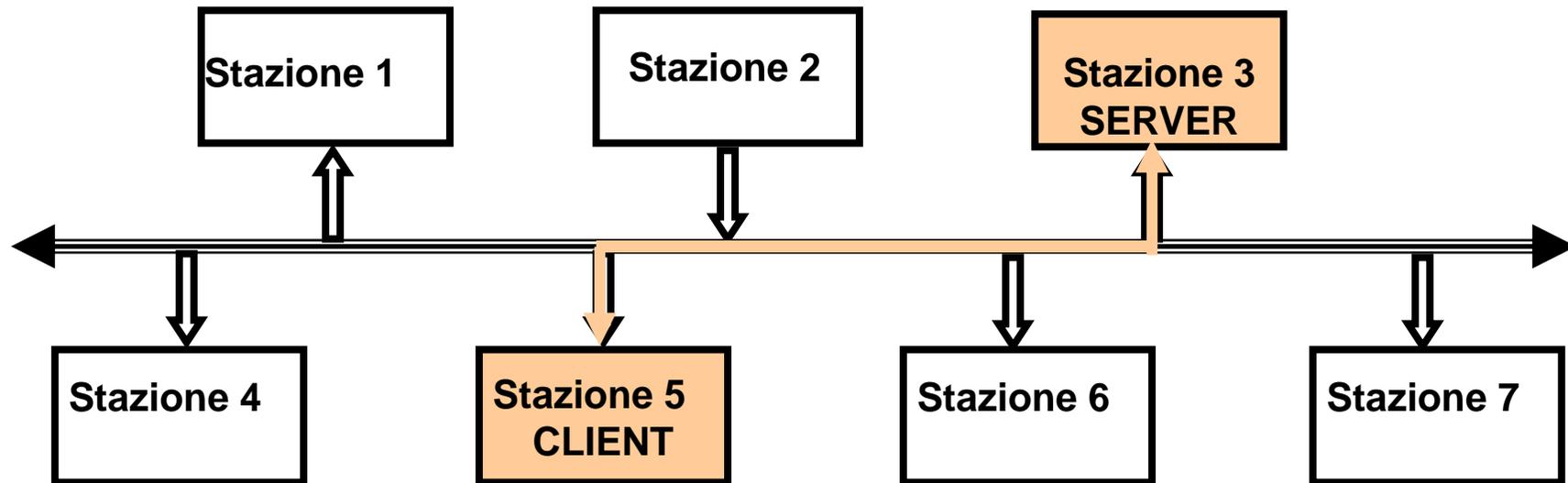
E' garantita la consistenza temporale: a meno del tempo di propagazione sul bus, la ricezione è simultanea

UNO a TUTTI
Global
addressing o
broadcasting

C'è un identificativo globale

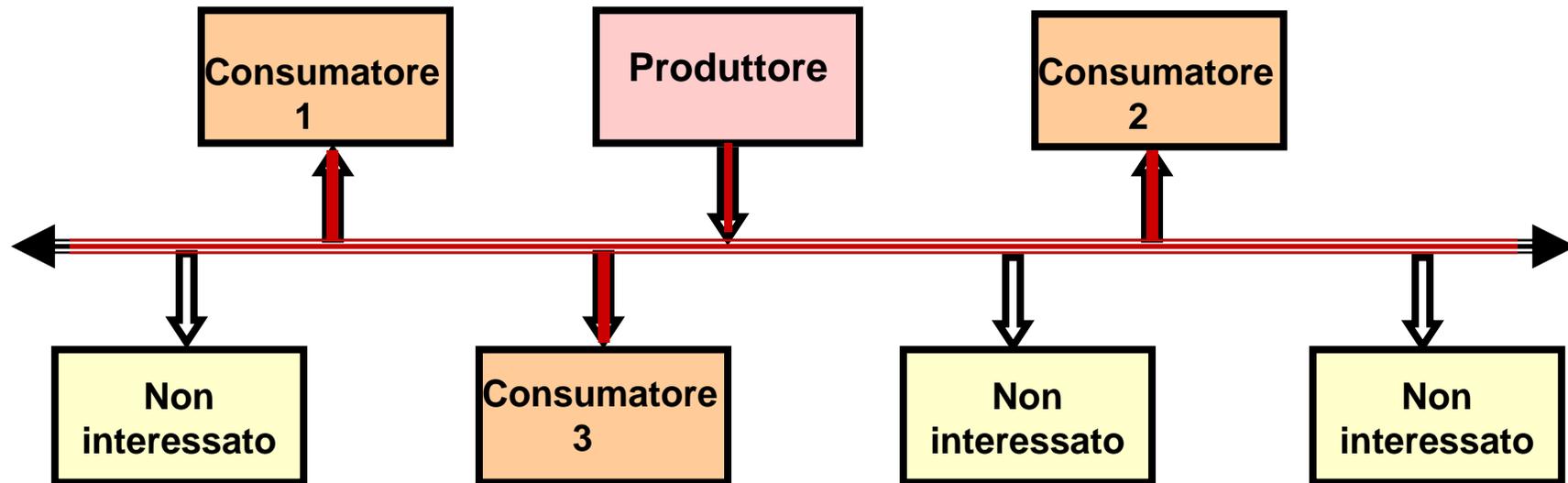
Indispensabile per alcuni servizi di gestione e manutenzione della rete

Modelli di comunicazione – Cliente Servitore



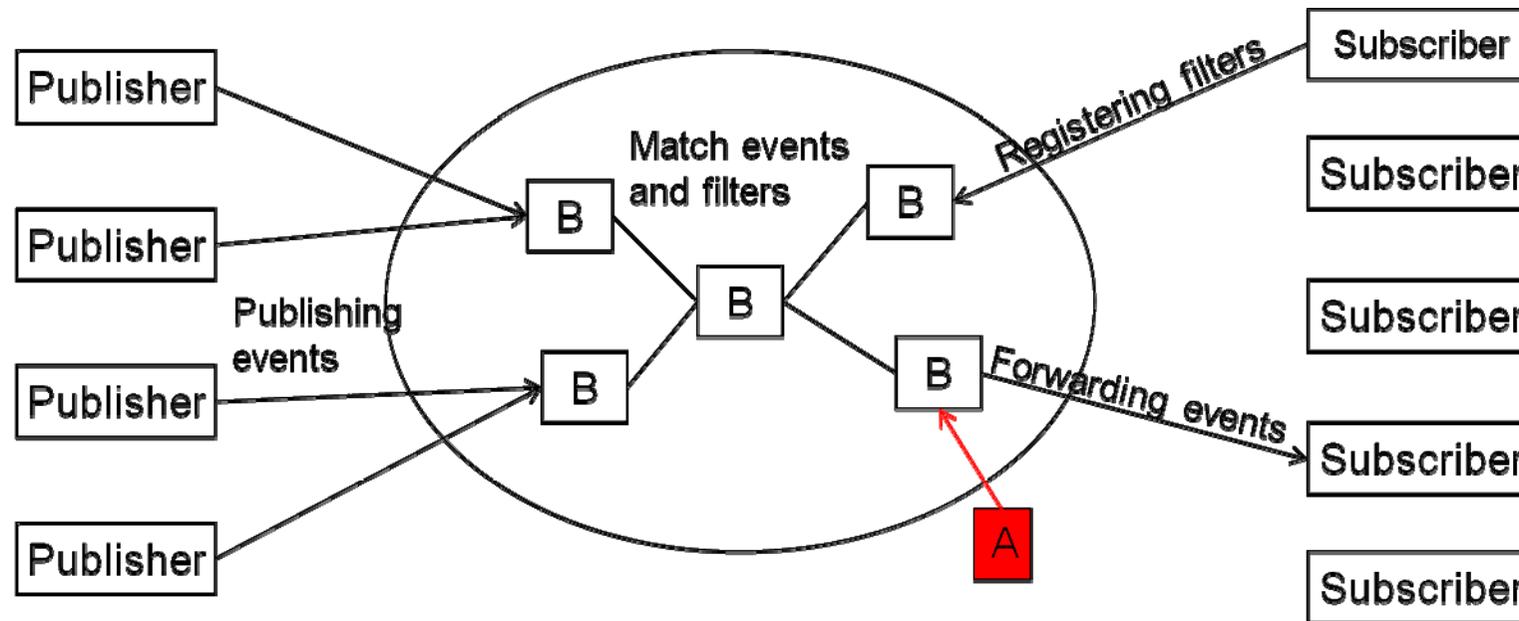
- Servizio **connesso** (con conferma – acknowledgement)
- Una stazione diventa Cliente quando richiede un servizio a un'altra stazione Servitore
- Il collegamento si attiva fra le due stazioni interessate (Comunicazione Peer to Peer)

Modelli di comunicazione – Produttore Consumatore



- Servizio **non connesso**
- Il Produttore trasmette un dato ricevuto da tutte le stazioni (**Comunicazione Broadcast**)
- Il servizio è utilizzato solo dalle stazioni interessate

Modelli di comunicazione – Publisher - Subscriber

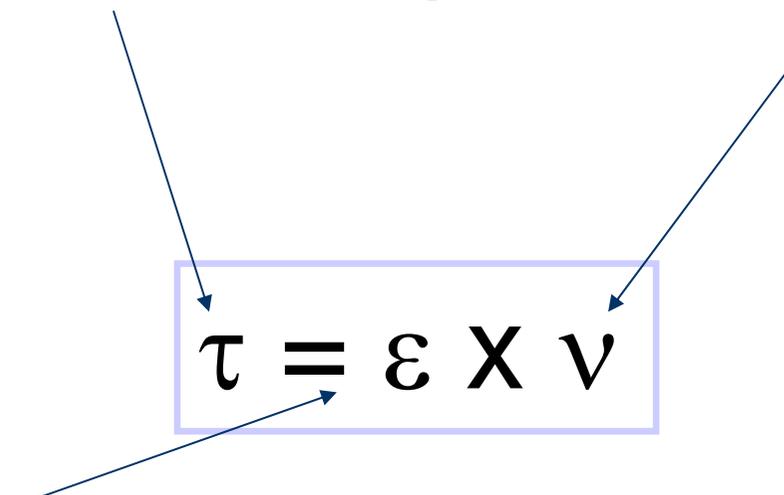


- Servizio **non connesso**
- Il Produttore trasmette un dato ricevuto dalle stazioni abbonate (**Comunicazione Multicast**)
- Il servizio è utilizzato solo dalle stazioni interessate

Efficienza di un bus di campo

**Throughput = bit *utili* trasmessi
nell' unità di tempo**

**Velocità di
trasmissione = bit al
secondo (BAUD)**

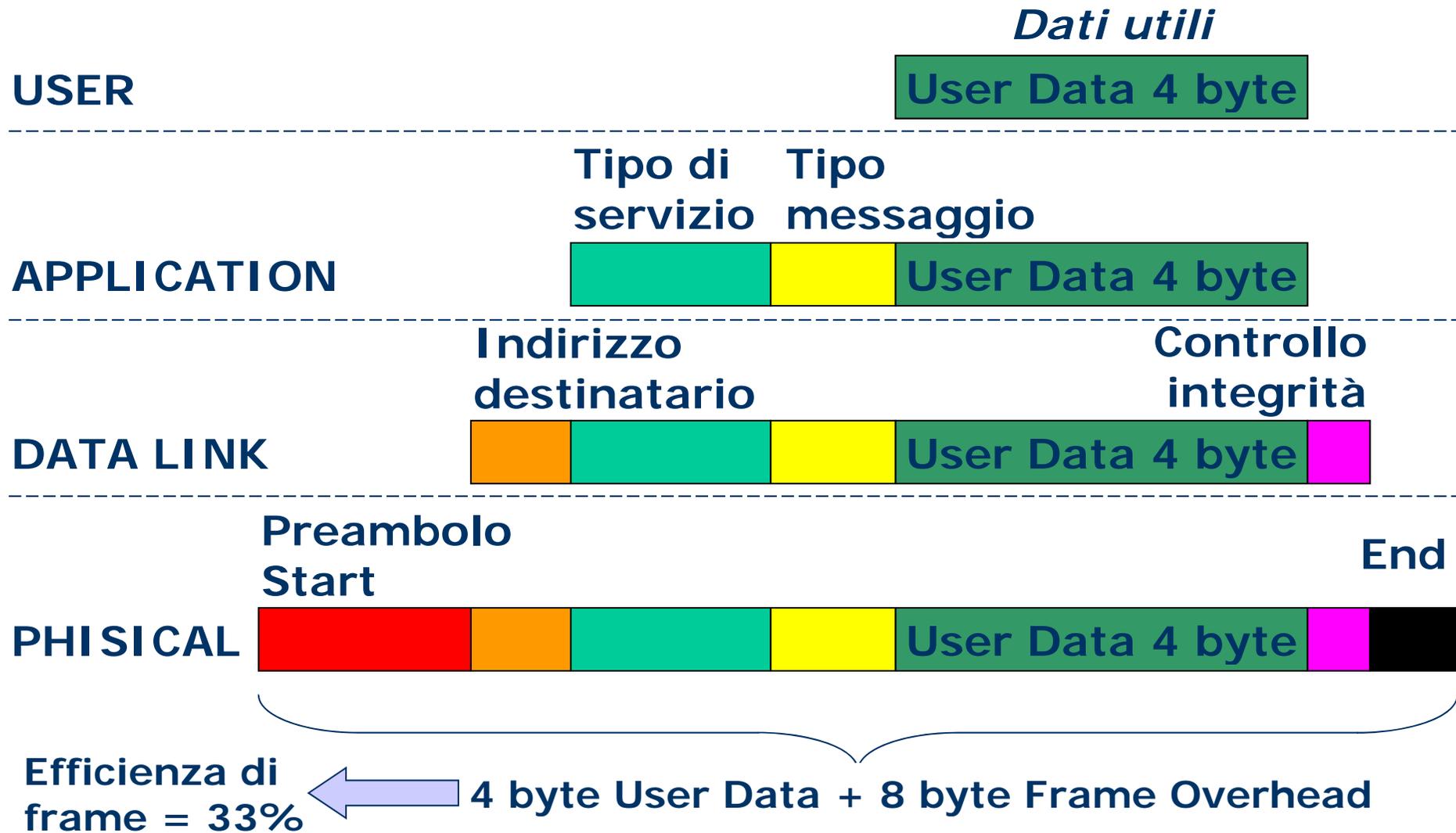

$$\tau = \epsilon \times v$$

L'efficienza complessiva, dipende da:

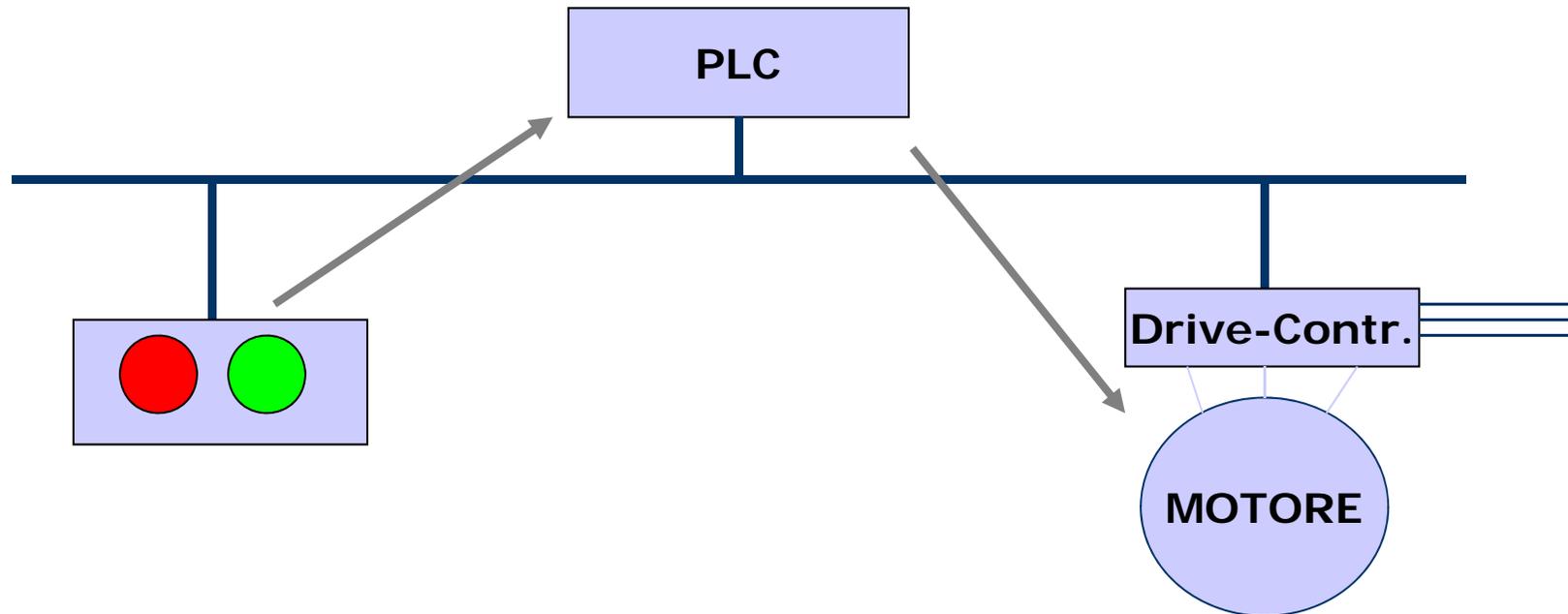
- **Efficienza dell' incapsulamento o frame overhead**
- **Modalità di accesso al bus**
- **Tecnica di indirizzamento e modelli di comunicazione**

Versione in fase di revisione e sistemazione. Non pubblicare o diffondere senza questo avviso.

Efficienza di un bus di campo



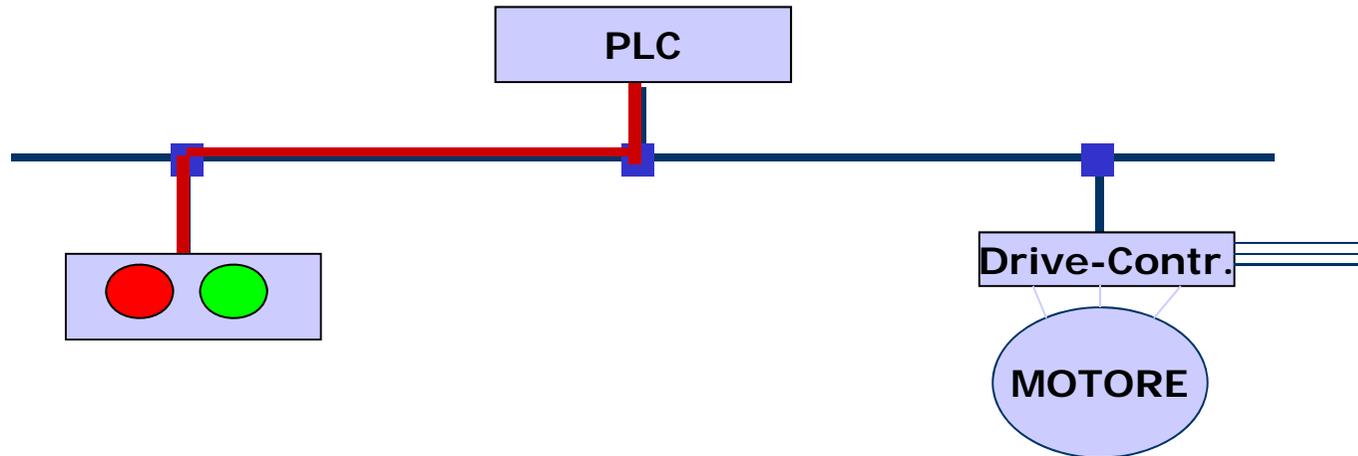
Tempi di risposta dei bus di campo



Tempo di risposta per l'avvio di un motore:

Il tempo che intercorre tra l'istante in cui è premuto il pulsante di start e l'avvio del motore

Tempi di risposta dei bus di campo

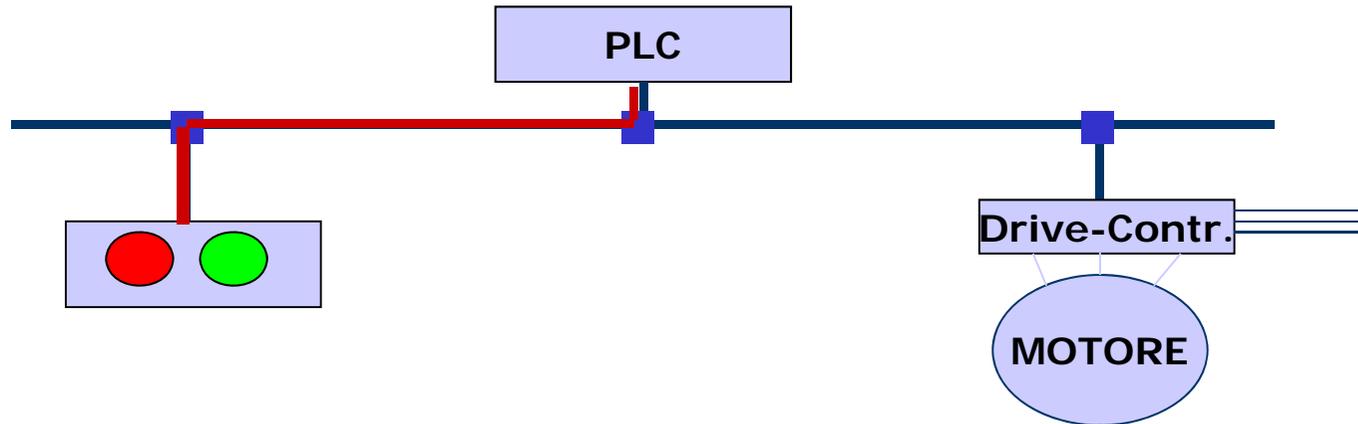


$t=0$ L'operatore preme il pulsante. L'informazione è originata all'interfaccia della pulsantiera (livello DLL)

$t=T_{L1}$ (Tempo di latenza) L'informazione circola sul bus. Dipende dalla gestione del bus (centralizzata, distribuita) e dalla modalità di trasmissione (polling, su evento). Può essere delimitata superiormente (es. 2 ms)

$t=T_{L1} + T_{T1}$ (Tempo di trasmissione del frame) L'interfaccia PLC riceve l'informazione

Tempi di risposta dei bus di campo



$$T_{T1} = T_{\text{frame}} \text{ (Tempo di modulaz. frame)} + T_{\text{prop}} \text{ (Tempo di propagazione)}$$

$$T_{\text{frame}} = T_{\text{bit}} * N \text{ bit/frame} =$$

$$= 10^{-6} * 64 = 0,064 \text{ ms}$$

$$T_{\text{prop}} = l/v = 10^2 / 3 \cdot 10^8 = 0,003 \text{ ms}$$

Velocità trasmiss. : 1 Mbit/s ($T_{\text{bit}} = 10^{-6} \text{ s}$)

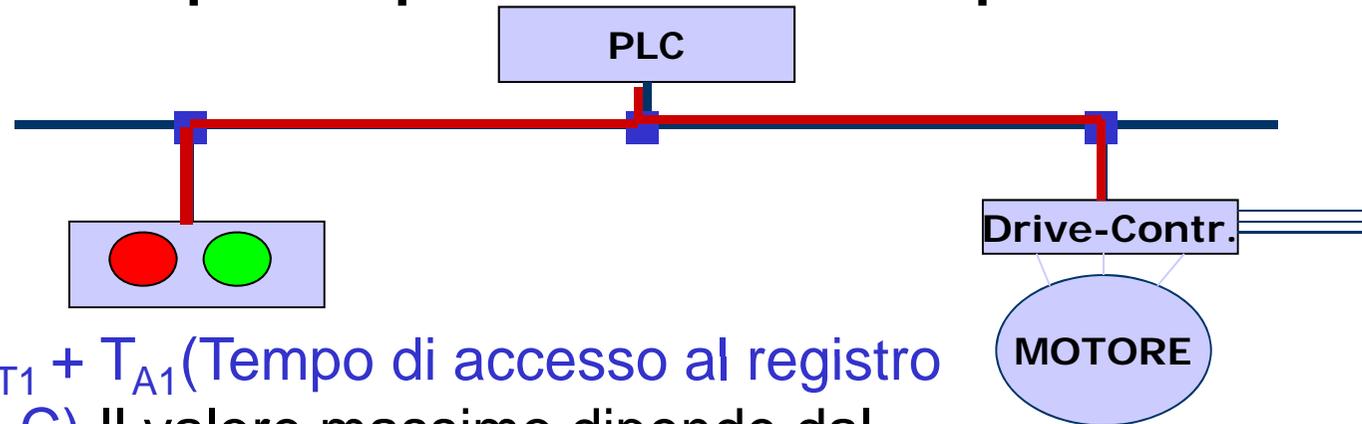
Frame (dati + overhead) 8 byte = 64 bit

Velocità propagazione: $v = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$

Lunghezza del collegamento 100 m

$$T_{T1} = T_{\text{frame}} + T_{\text{prop}} = T_{\text{frame}} \approx 0,064 \text{ ms}$$

Tempi di risposta dei bus di campo



- $t = T_{L1} + T_{T1} + T_{A1}$ (Tempo di accesso al registro IN del PLC) Il valore massimo dipende dal tempo di ciclo del PLC
- $t = T_{L1} + T_{T1} + T_{A1} + T_E + T_{L2}$ (Tempo di elaborazione del PLC)
 - Valori tipici di T_E 0,2 – 20 ms/kistruzioni
- T_{L2} (Tempo di latenza) vedi T_{L1}
- $t = T_{L1} + T_{T1} + T_{A1} + T_E + T_{L2} + T_{T2} + T_{A2}$ (Tempo di trasmissione ed elaborazione dell'azionamento)

Tempo massimo di risposta

- $T_{Rmax} = T_{L1max} + T_{T1} + T_{A1max} + T_E + T_{L2max} + T_{T2} + T_{A2max}$

Versione in fase di revisione e sistemazione. Non pubblicare o diffondere senza questo avviso.

Tempi di risposta dei bus di campo

$$T_{Rmax} = (T_{L1max} + T_{L2max}) + 2 * T_T + T_E + T_{A2max} = 4,4 - 44 \text{ ms}$$

Dipende dal DLL e dalla modalità di trasmissione

Es. 4 ms

Dipende dalla velocità di trasmissione e la lunghezza del frame

Es. 0,13 ms

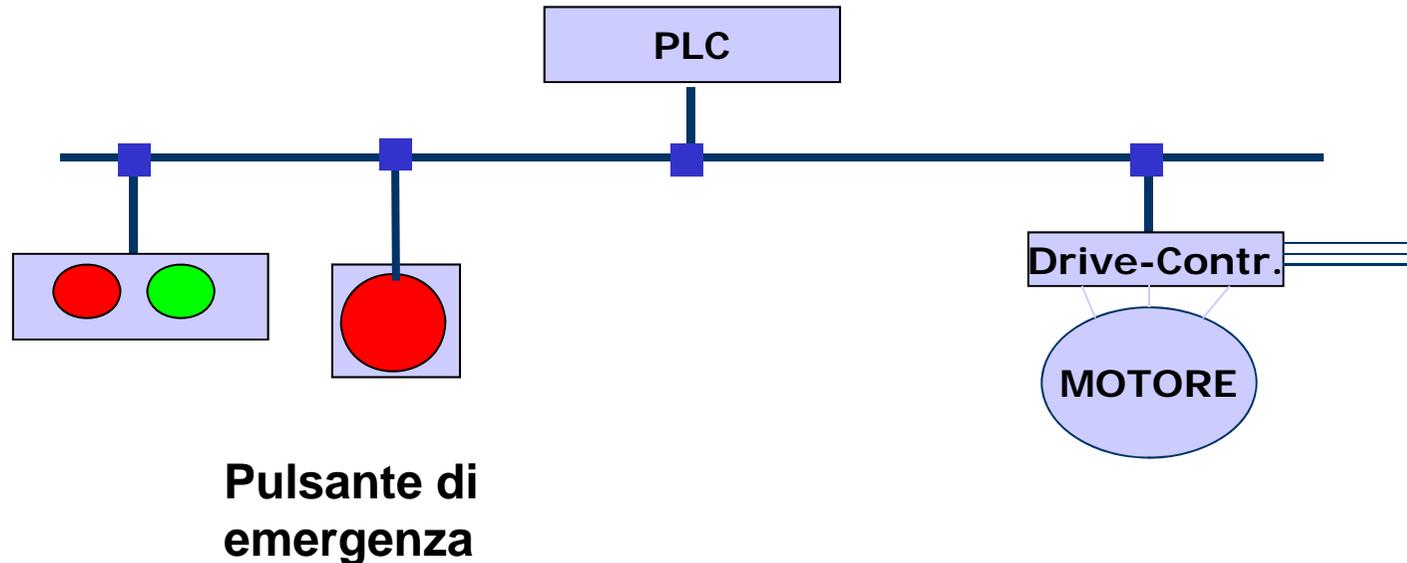
Dipende dalla tecnologia del PLC e complessità del programma

Es. 0,4- 40 ms

Dipende dalla tecnologia dell'azionamento

Es. 0,01 ms

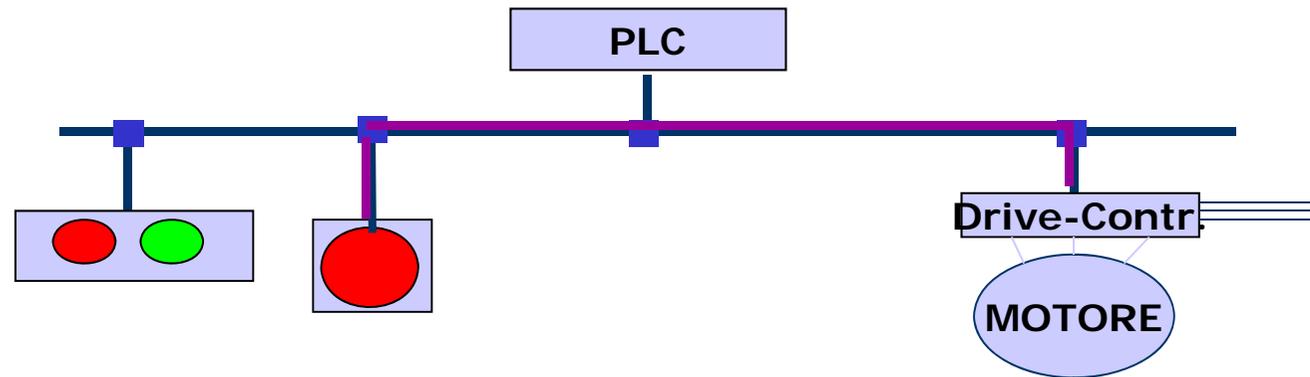
Tempi di risposta dei bus di campo



Nei casi di emergenza la risposta deve essere più pronta

La struttura del bus deve prevedere un collegamento diretto tra nodi (producer consumer) saltando il PLC

Tempi di risposta dei bus di campo



$t=0$ L'operatore preme il pulsante. L'informazione è originata all'interfaccia della pulsantiera (livello DLL)

$t=T_{L1}$ (Tempo di latenza) L'informazione circola sul bus. La modalità di trasmissione sarà **su evento**. Può essere delimitata superiormente come in precedenza (es. 2 ms)

$t=T_{L1} + T_{T1}$ (Tempo di trasmissione del frame) L'interfaccia azionamento riceve l'informazione

$t=T_{L1} + T_{T1} + T_{A2}$ (Tempo di trasmissione ed elaborazione dell'azionamento) L'azionamento esegue lo stop.

Tempi di risposta dei bus di campo - EMERGENZA

$$T_{Rmax} = T_{Lmax} + T_T + T_{Amax} \cong 2 \text{ ms}$$

Dipende dal DLL e
dalla modalità di
trasmissione

Es. 2 ms

Dipende dalla
velocità di
trasmissione e la
lunghezza del
frame

Es. 0,064 ms

Dipende dalla tecnologia
dell'azionamento

Es. 0,01 ms