

SISTEMI PER L'INDUSTRIA E PLC

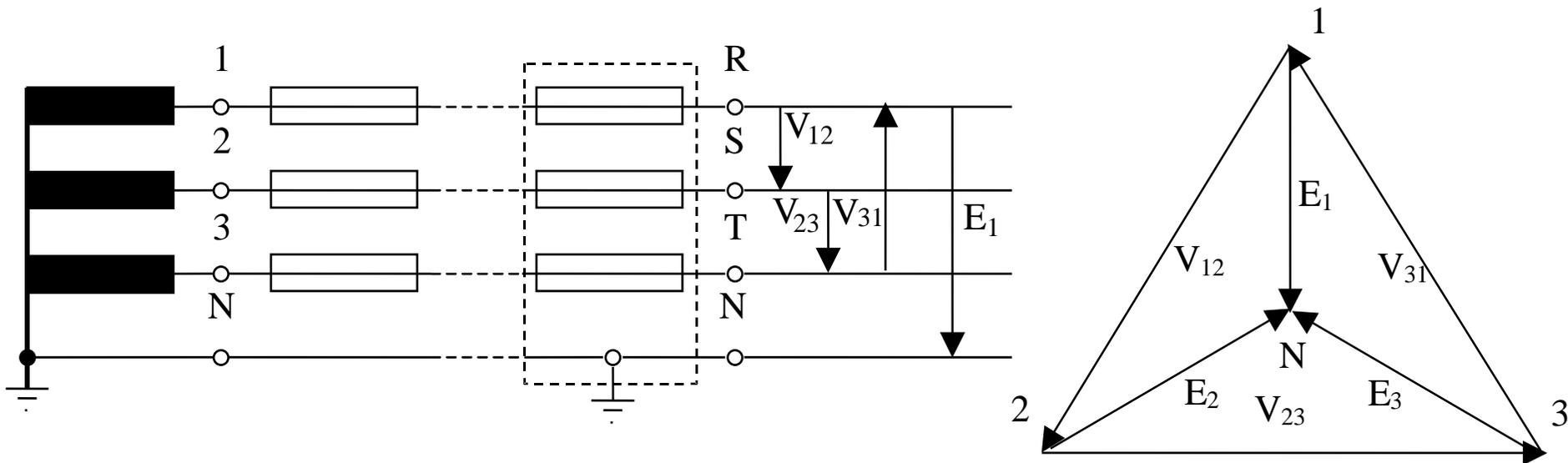
SEZIONE 4

Il livello di campo, dei sensori e degli attuatori

Nota: le slide con (*) sono da considerarsi approfondimenti

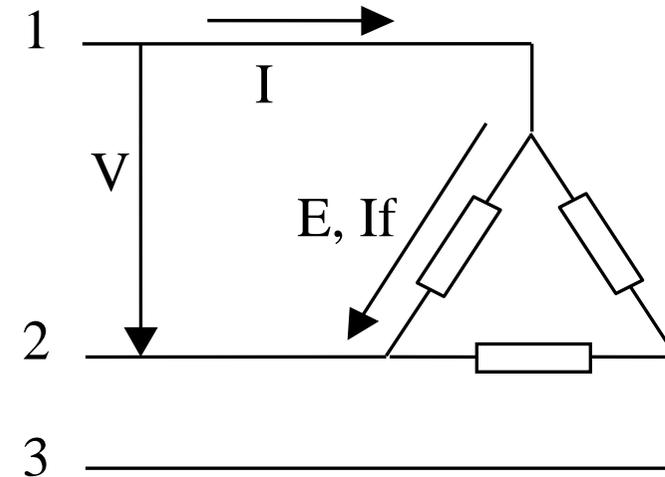
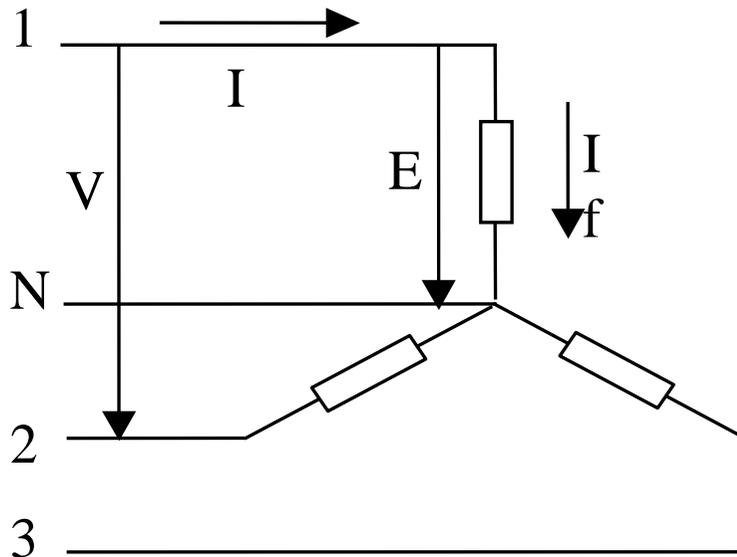
SISTEMA TRIFASE

- Sistema di 3 tensioni sinusoidali a frequenza $50\text{Hz} \pm 5\%$ sfasate tra loro di 120° :
 - In ogni istante la somma delle 3 fasi è nulla
 - Generazione a 380kV, distribuzione a 380kV, 110kV, 10kV,.. 380V
 - Tensioni “stellate” $E_i = 220V_{\text{eff}} \sin(2\pi * 50\text{Hz} * t + 120^\circ i)$ (fase e neutro in casa)
 - Tensioni “concatenate” $E_{12} = V_{12} = 2 * \cos(30^\circ) * 220V_{\text{eff}} = \sqrt{3} * 220V_{\text{eff}} = 380V_{\text{eff}}$



SISTEMA TRIFASE: CARICHI

- Dato un sistema di alimentazione trifase i carichi possono essere connessi a stella (3 carichi uguali tra fase e neutro) o a triangolo (3 carichi uguali tra fase e fase)



$$V = \sqrt{3} * E, \quad I = I_f, \quad P_{load} = E * I_f = V * I / \sqrt{3} = V^2 / 3R$$

$$V = E, \quad I = \sqrt{3} I_f, \quad P_{load} = E * I_f = V * I / \sqrt{3} = V^2 / R$$

- Il carico a stella assorbe meno potenza

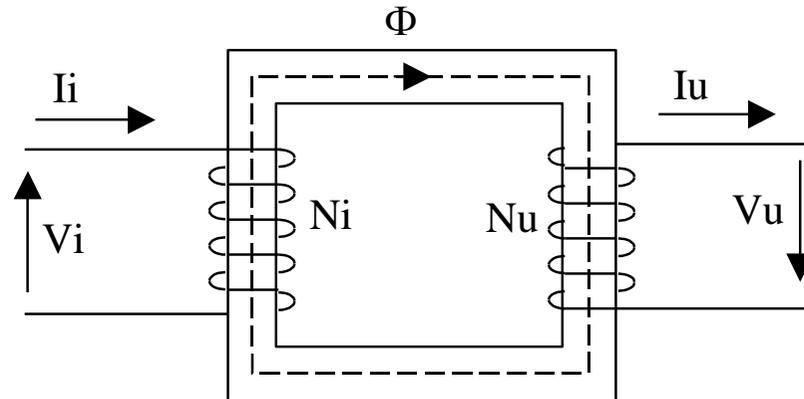
(per entrambi $P_{apparente} = S[V * A] = 3E * I_f = \sqrt{3} V * I$, $P[W] = S * \cos\phi$, $Q[var] = S * \sin\phi$)

MACCHINE ELETTRICHE

- ❑ **Trasformatori**
(trasferiscono potenza modificando tensioni e correnti)
- ❑ **Generatori**
(convertono energia meccanica in energia elettrica)
- ❑ **Motori**
(convertono energia elettrica in energia meccanica)

TRASFORMATORE

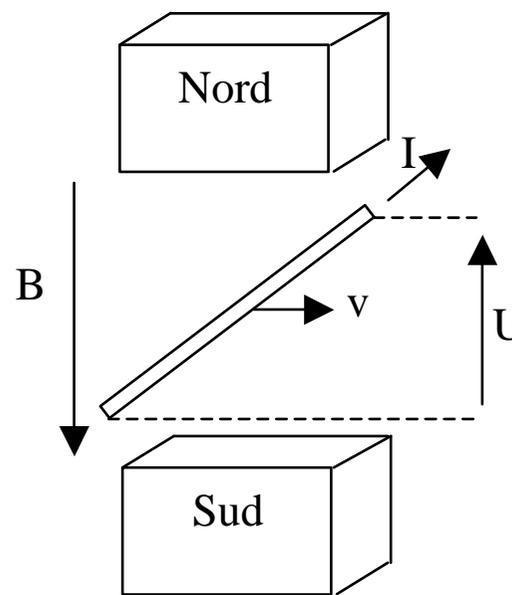
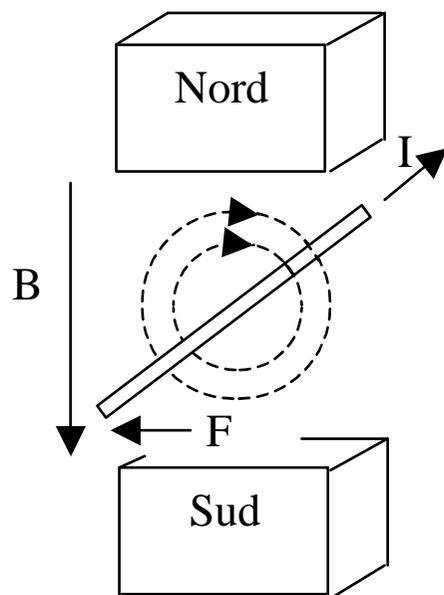
- ❑ Il trasformatore riceve in ingresso potenza, in termini di tensione V_i e corrente I_i , e la restituisce in uscita variando correnti e tensioni sulla base di un rapporto di trasformazione $k = N_i/N_u = V_i/V_u = I_u/I_i$



- ❑ Modificano il valore della tensione (Es. 10kV -> 380V -> 24V)
- ❑ Isolano elettricamente il carico dalla rete
- ❑ “Filtrano” il carico dalla rete (comportamento induttivo –filtro LC-)

PRINCIPIO DEL MOTORE E DEL GENERATORE

- ❑ Su un conduttore di lunghezza l percorso da corrente i e immerso in un campo magnetico di induzione B agisce una forza meccanica F che tende a generare uno spostamento (principio del motore)
- ❑ Se un conduttore di lunghezza l immerso in un campo magnetico di induzione B viene spostato lungo una certa direzione con velocità v allora ai suoi capi si genera una tensione U (principio del generatore)



TIPI DI MOTORI

- ❑ **Da un punto di vista costruttivo il motore è costituito da:**
 - **Parti costruttive attive per la conduzione a minima dispersione del flusso magnetico**
 - **Avvolgimenti per la generazione del flusso magnetico**
 - **Parti costruttive ausiliarie (sostegni, cuscinetti, alberi,...)**

- ❑ **Da un punto di vista strutturale il motore è costituito da:**
 - **Statore (parte fissa)**
 - **Rotore (parte mobile)**
 - **Traferro (separazione)**

- ❑ **Variando il tipo di statore (ad avvolgimenti, a poli,...) o il tipo di rotore si ottengono diversi tipi di motore:**
 - **Motore in corrente continua (C.C.)**
 - **Motore in corrente alternata (A.C.)**
 - **motore sincrono**
 - **motore asincrono,....**

LE PERDITE NELLE MACCHINE ELETTRICHE

- ❑ **Perdite:** -> calore -> raffreddamento
 - Perdite a vuoto (magnetizzazione, attrito, eccitazione)
 - Perdite sotto carico
 - Potenza utilizzata P_u < potenza erogata P_e
 - Rendimento η del motore ($\eta = P_u / P_e$)
 - $P_e - P_u$ -> calore
 - Calore -> calo affidabilità e rendimento -> raffreddamento

- ❑ **Raffreddamento**
 - Passaggio di aria
(ventilazione naturale o ventilazione forzata mediante ventilatori esterni o previsti nel motore)
 - Circolazione di liquidi
(la macchina o parte di essa viene percorsa da acqua o altro liquido o è immersa in tale liquido)

- ❑ **Protezioni per sovratemperatura del motore**

MACCHINE ELETTRICHE: protezioni dagli agenti esterni

□ **Grado di protezione: IP_{xy}**

□ **x: protezione dall'intrusione di solidi**

0: nessuna protezione

1: grandi corpi –mano-

2: corpi medi –dito-

3: corpi piccoli (<2.4mm)

4: fili (d<1mm)

5: deposito di polvere

6: polvere (protezione completa)

y: protezione dall'intrusione di liquidi

0: nessuna protezione

1: gocce di condensa

2: pioggia (inclinazione 0-15°)

3: pioggia (inclinazione 0-60°)

4: pioggia (qualunque inclinazione)

5: temporanea inondazione

6: getti d'acqua da ogni direzione

7: penetrazione di acqua

8: acqua in pressione

MOTORI: CONDIZIONI OPERATIVE

□ Curve caratteristiche = curve coppia-giri

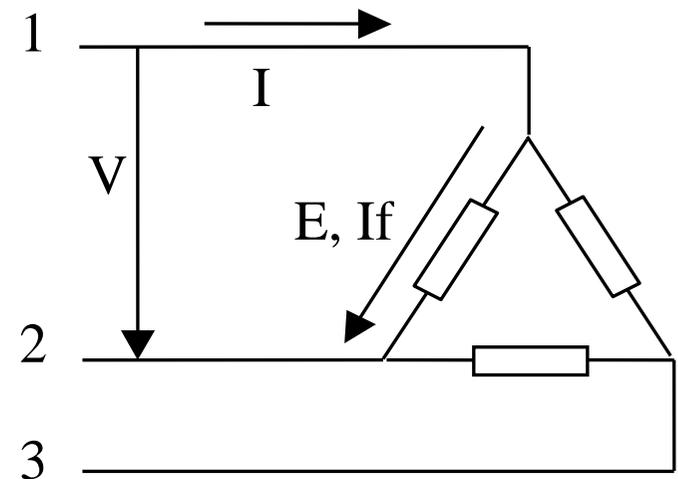
- $N = \text{numero giri al minuto} = \text{costante} \leftrightarrow$

Coppia resistente $R = \text{coppia motrice } M = F \cdot r = B \cdot I \cdot l \cdot m \cdot r \propto B \cdot I$
 (m = numero conduttori di lunghezza l, r = raggio rotore)

- Potenza motrice $P = F \cdot s/t = F \cdot 2\pi r \cdot n = 2\pi \cdot M \cdot n$

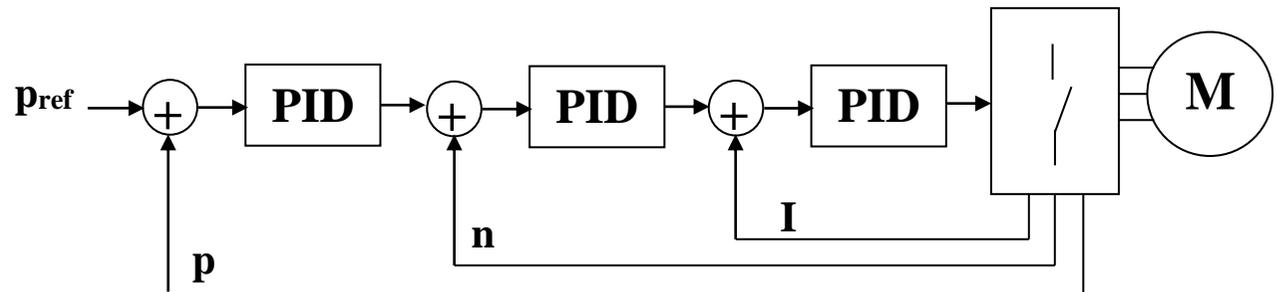
□ Motori (A.C. induction motor) a inserzione diretta

- 50 Hz = 3000 rpm (round per minute)
- buon rendimento a $M = M_{\text{load}}, n = n_{\text{nom}}$
- bassa impedenza da fermi
 - tanta corrente
 - coppia di spunto bassa
 - corrente da fermo = calore
- avviamento stella-triangolo per limitare I_f
 - stella: $V = \sqrt{3} \cdot E, I = I_f = E/R = V/\sqrt{3}R$
 - triangolo: $V = E, I = \sqrt{3}I_f, I_f = E/R = V/R$
 - Riduzione coppia di spunto, brevi sovracorrenti alla commutazione



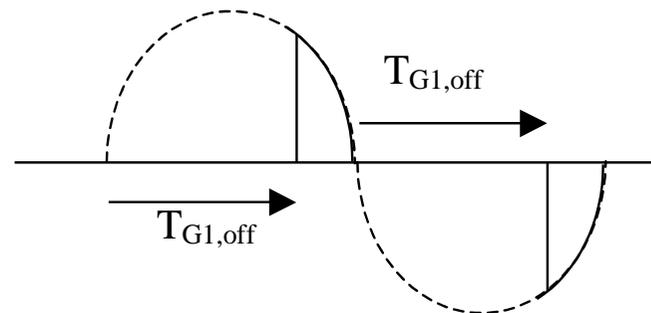
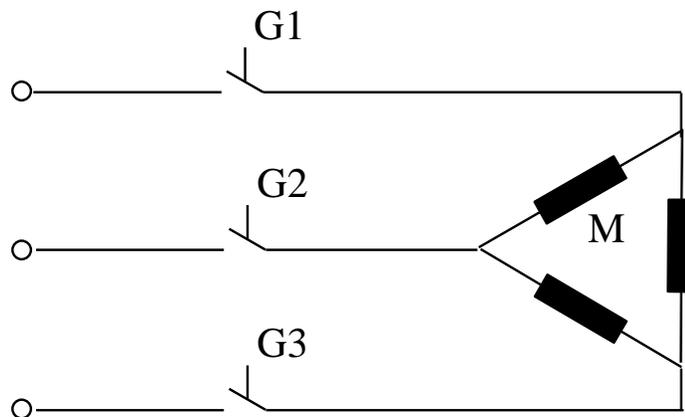
AZIONAMENTI

- ❑ Utilizzati per ottenere avviamenti controllati e/o regolazione della velocità
- ❑ In prima approssimazione:
 - controllano la coppia regolando la corrente
 - controllano la velocità regolando la tensione
- ❑ Controllo digitale (PID)
- ❑ Gestiscono le protezioni
 - massima corrente
 - protezione termica
- ❑ Forniscono indicazioni diagnostiche
 - corrente, velocità, posizione
 - stato dei comandi e delle protezioni
- ❑ Si interfacciano ai sistemi di controllo e supervisione



SOFT STARTER

- ❑ Utilizzati per ottenere avviamenti controllati
- ❑ La tensione al motore viene regolata regolando l'angolo d'innesco degli interruptori elettronici G1, G2, G3 rispetto all'angolo di accensione naturale (anello aperto)
 - rampa lineare di tensione
 - doppia pendenza per superare la coppia resistente iniziale
 - la velocità non si muove linearmente con la tensione
 - carico leggero -> velocità nominale prima della tensione nominale
 - carico pesante -> velocità nominale dopo la tensione nominale

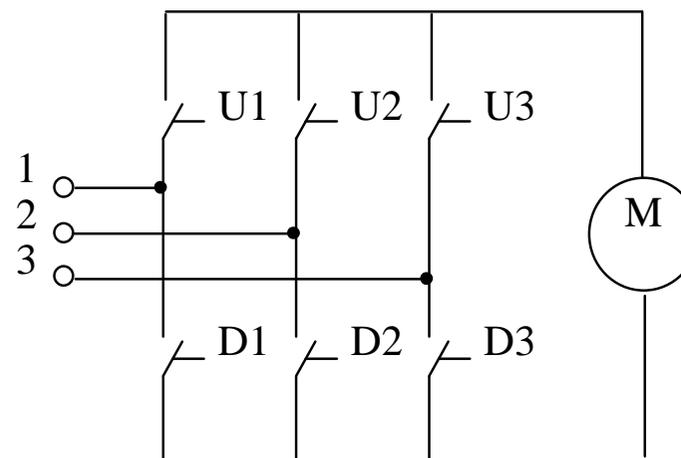


AZIONAMENTI AC/DC

- ❑ Utilizzati per la regolazione di motori in corrente continua
- ❑ Azionamenti in C. C.
 - ottime prestazioni (dinamica, accuratezza, assenza di vibrazioni)
 - funzionamento sui 4 quadranti (motore avanti, motore indietro, recupero avanti, recupero indietro)
 - regolazione della tensione continua di armatura
 - ciascuna coppia agisce in conduzione naturale per 1/6 del periodo

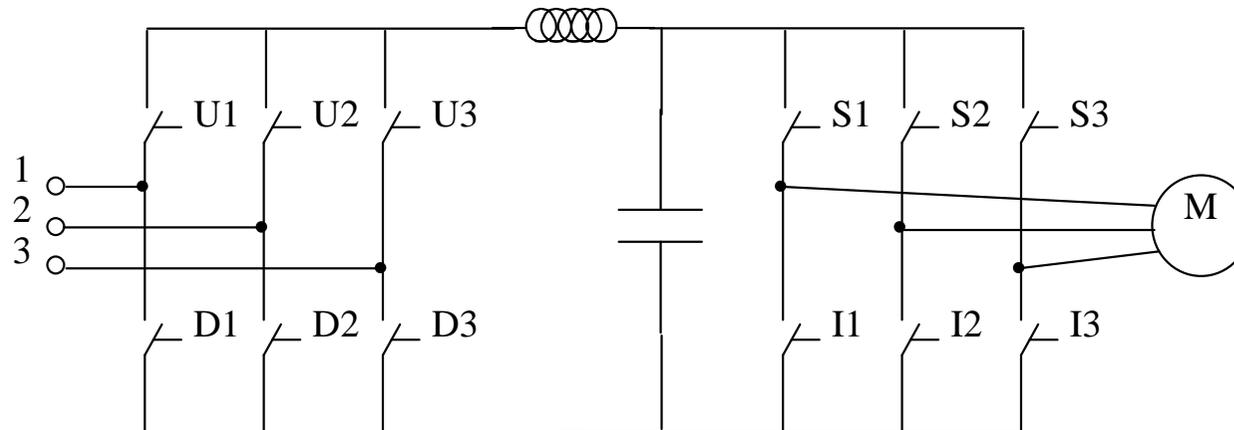
SEQUENZA DELLE FASI:

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| U1 | U1 | U2 | U2 | U3 | U3 | U1 | ... |
| D2 | D3 | D3 | D1 | D1 | D2 | D2 | ... |



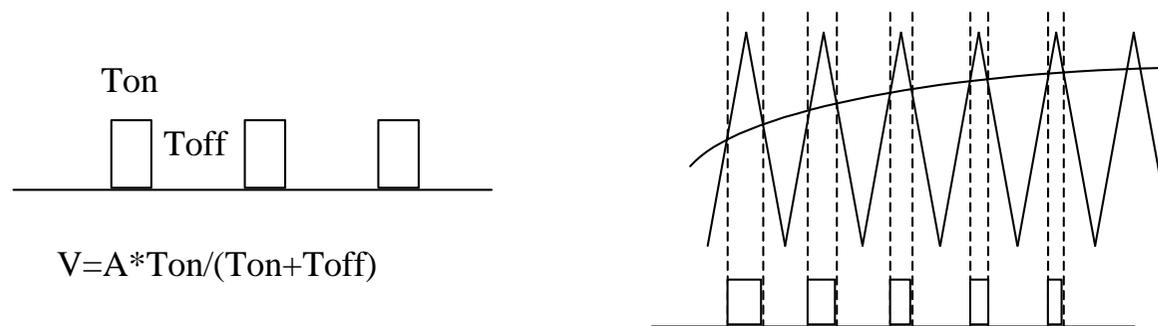
AZIONAMENTI AC/AC

- ❑ **Inverter: utilizzati per la regolazione di tensione e frequenza dei motori in A.C.**



- ❑ **Convertitore AC/DC seguito da un convertitore DC/AC**

- **sinusoidi mediante interruttori -> PWM (Pulse Width Modulation)**
- **onda rettangolare (A, $D = T_{on} / (T_{on} + T_{off})$) -> filtro passa-basso -> $V_{DC} = A * D$.**
- **sinusoide PWM = uscita comparatore tra sinusoidi (f) e onda triangolare ($\gg f$)**

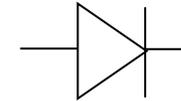


INTERRUTTORI DI POTENZA

❑ **Potenze medio basse: transistori bipolari e MOSFET di potenza**

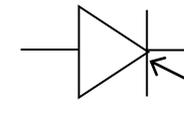
❑ **Diodi di potenza**

- **non consentono alcuna parzializzazione dell'angolo d'innescò**
- **configurazione in antiparallelo per la bidirezionalità**



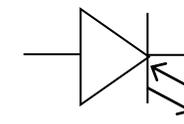
❑ **Tiristore**

- **4 strati (PNPN)**
- **diodo con accensione controllata dal gate**
- **spegnimento non controllato**



❑ **GTO (Gate Turn Off thyristor)**

- **Si spegne applicando una tensione negativa al gate**



❑ **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)**

- **Combina la tecnologia bipolare e CMOS**
- **Perdite nulle -> maggiori potenze**



ATTUATORI

- ❑ **Organi di comandi, discreti (ON/OFF) o continui (es. azionamenti)**

- ❑ **Comandi:**
 - **da operatore**
 - **da sistema automatico**

- ❑ **Comandi di emergenza:**
 - **da operatore (diretto) e da sistema automatico**

- ❑ **Alcuni tipi di attuatori:**
 - **Lampade di segnalazione (220AC, 24AC, 24DC,..)**
 - **Attuatori termici (forni, impianti di riscaldamento, raffreddamento,..)**
 - **regolazione continua della tensione applicata al riscaldatore**
 - **regolazione ON/OFF**
 - **Attuatori elettromagnetici (elettromagneti di sollevamento, freni, giunti, valvole, relais...)**

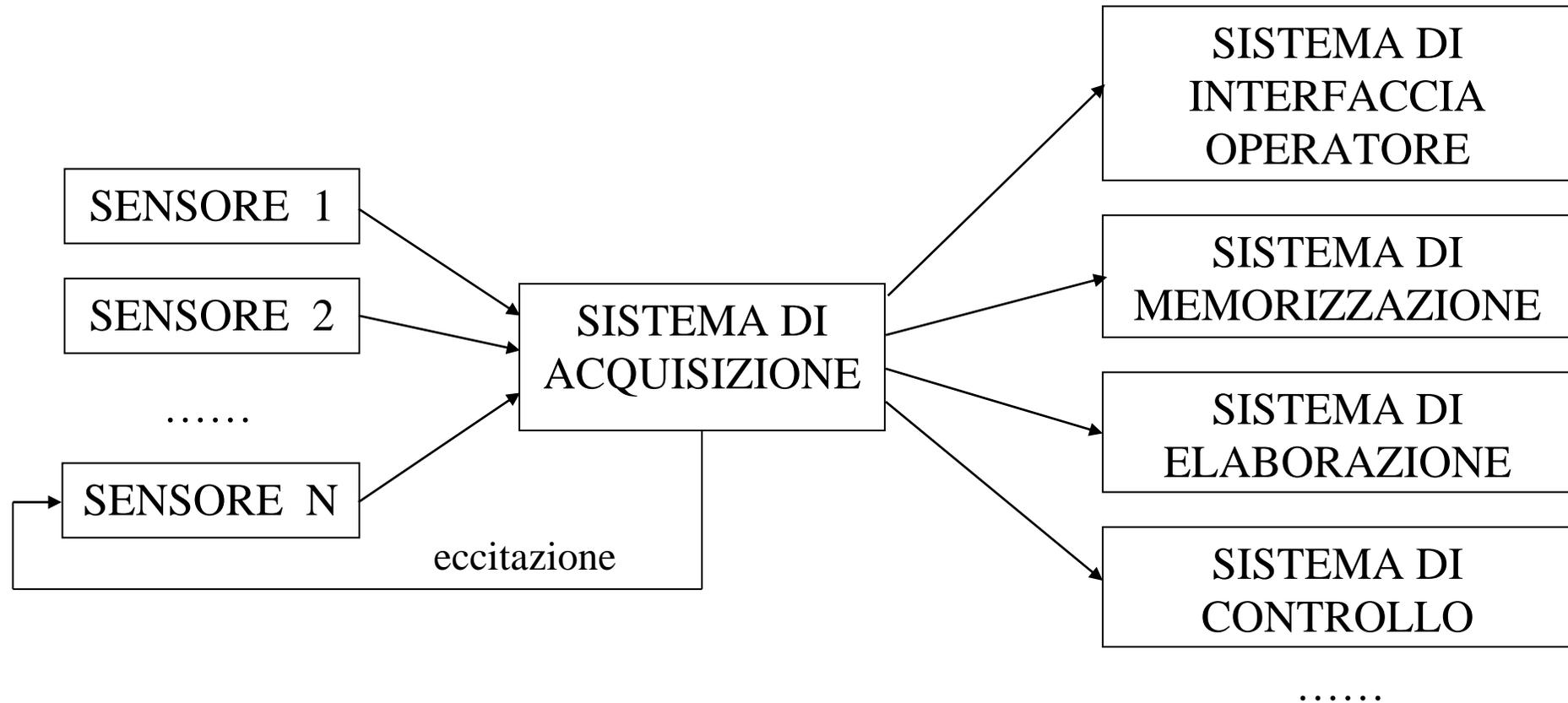
SENSORI

- ❑ **Sensore: converte una grandezza fisica (misurando) in un segnale elettrico**

- ❑ **Classificazione:**
 - **Principio fisico**
 - **Grandezza da misurare**
 - **Settore applicativo**

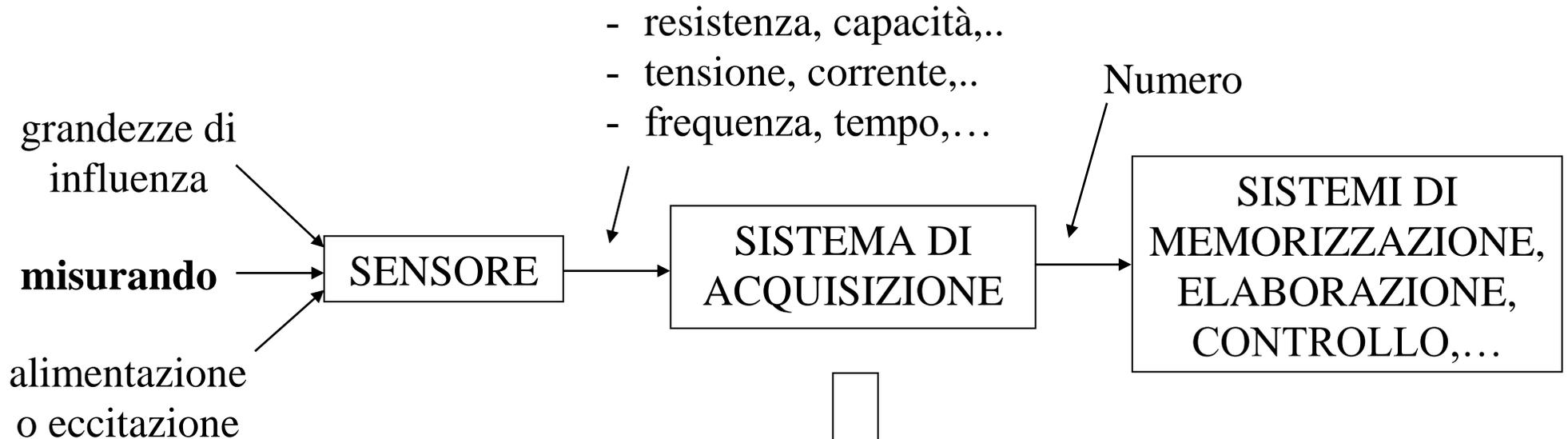
- ❑ **Classificazione energetica:**
 - **Sensori attivi (non necessitano di potenza esterna)**
 - **segnale di uscita debole (richiedono amplificazione)**
 - **sensori piezoelettrici, fotoelettrici,....**
 - **Sensori passivi (necessitano di potenza esterna per fornire il segnale di uscita)**
 - **dissipano, si deteriorano,....**
 - **sensori resistivi, capacitivi,....**

USO DEI SENSORI



- ❑ **I sensori forniscono segnali elettrici in relazione con la grandezza di interesse**
- ❑ **Necessitano di sistemi di acquisizione (interfaccia, preelaborazione) prima dell'uso finale**

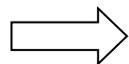
ACQUISIZIONE DATI DA SENSORI



| CONDIZIONAMENTO | ACQUISIZIONE |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - isolamento - amplificazione / attenuazione - filtro - multiplexing /campionamento simultaneo - | <ul style="list-style-type: none"> - conversione A/D - sistemi di conteggio - elettronica analogica dedicata - |

SENSORI: problematiche

- ❑ **Termocoppie (sensori di temperatura)**
 - **non necessitano di alimentazione, segnale piccolo (μV), temperatura di giunto freddo**
- ❑ **Celle estensimetriche (sensori di spostamento)**
 - **necessitano di alimentazione, dipendono dalla temperatura (configurazione a ponte)**
- ❑ **Cellule fotoelettriche (sensori di presenza)**
 - **necessitano di alimentazione e isolamento, problemi di interferenza, segnale facile da trattare (ON/OFF)**
- ❑ **Encoder incrementale (sensori di posizione, velocità)**
 - **necessitano di alimentazione, segnali in quadratura da gestire in tempo reale**
- ❑ **...**



CONDIZIONAMENTO E PREELABORAZIONE “AD HOC”

SENSORI: CARATTERIZZAZIONE

- ❑ **Caratteristiche statiche**
descrivono le prestazioni del sensore in condizioni normali con variazioni lente dell'ingresso ed in assenza di sollecitazioni esterne
- ❑ **Caratteristiche dinamiche**
descrivono il comportamento del sensore alle variazioni dell'ingresso con il tempo
- ❑ **Caratteristiche ambientali**
si riferiscono alle prestazioni del sensore dopo l'esposizione -condizioni ambientali non operative- o durante l'esposizione -condizioni ambientali operative- a specifiche sollecitazioni esterne
- ❑ **Caratteristiche di affidabilità**
sono relazionate alla vita utile del sensore e a possibili cause di mal funzionamento nel sistema in cui è inserito

SENSORI: CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO

- ❑ **Esiste una relazione ideale h tale che $Out = h(M)$**
 - **In genere h è lineare**
 - **Invece della funzione h , il costruttore mette a disposizione grafici o tabelle garantiti per valori tipici delle grandezze di influenza**

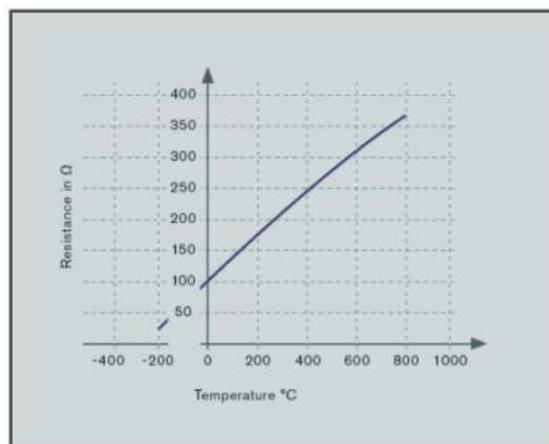
- ❑ **Acquisito Out , si ricava la stima di $M = \langle M \rangle = h^{-1}(Out)$**

- ❑ **Sensore reale:**
 - **Peculiarità costruttive -> h differisce leggermente da sensore a sensore**
 - **Fascia di incertezza massima α $\langle M \rangle = h^{-1}(Out \pm \alpha [\% (Out_{max} - Out_{min})])$**
 - **Determino α sulla base della calibrazione (taratura) del singolo sensore**

- ❑ **Calibrazione**
 - **Test nei quali si applicano al sensore valori noti registrandone i valore di uscita**
 - **Caratteristica di trasferimento per punti**
 - **Riduce α , incide sul costo del sensore**

Esempio: PT100

- **PT100 = il Platino varia la sua resistenza al variare della temperatura ($\alpha = 0,0038501/^\circ$)**
 - **PT100 è la resistenza che vale 100Ω a 0°C**
 - **T(-50°C) = 80,7495 Ω (80,31 da tabella)**
 - **T(50°C) = 119,2505 Ω (119,4 da tabella)**
 - **T(100°C) = 138,501 Ω (138,5 da tabella)**
 - **T(200°C) = 177,002 Ω (175,84 da tabella)**
 - **La caratteristica non è lineare (Carel PT100)**
 - **Limitazione del range o linearizz. a tratti**
 - **Leggo un numero, ricavo R, ma T???**



| °C | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | °C |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| -200 | 10,49 | | | | | | | | | | | -200 |
| -190 | 22,80 | 22,37 | 21,94 | 21,51 | 21,08 | 20,65 | 20,22 | 19,79 | 19,36 | 18,93 | 18,49 | -190 |
| -180 | 27,08 | 26,65 | 26,23 | 25,80 | 25,37 | 24,94 | 24,52 | 24,09 | 23,66 | 23,23 | 22,80 | -180 |
| -170 | 31,32 | 30,90 | 30,47 | 30,05 | 29,63 | 29,20 | 28,78 | 28,35 | 27,93 | 27,50 | 27,08 | -170 |
| -160 | 35,53 | 35,11 | 34,69 | 34,27 | 33,85 | 33,43 | 33,01 | 32,59 | 32,16 | 31,74 | 31,32 | -160 |
| -150 | 39,71 | 39,30 | 38,88 | 38,46 | 38,04 | 37,63 | 37,21 | 36,79 | 36,37 | 35,95 | 35,53 | -150 |
| -140 | 43,87 | 43,45 | 43,04 | 42,63 | 42,21 | 41,79 | 41,38 | 40,96 | 40,55 | 40,13 | 39,71 | -140 |
| -130 | 48,00 | 47,59 | 47,18 | 46,76 | 46,35 | 45,94 | 45,52 | 45,11 | 44,70 | 44,28 | 43,87 | -130 |
| -120 | 52,11 | 51,70 | 51,29 | 50,88 | 50,47 | 50,06 | 49,64 | 49,23 | 48,82 | 48,41 | 48,00 | -120 |
| -110 | 56,19 | 55,78 | 55,38 | 54,97 | 54,56 | 54,15 | 53,74 | 53,33 | 52,92 | 52,52 | 52,11 | -110 |
| -100 | 60,25 | 59,85 | 59,44 | 59,04 | 58,63 | 58,22 | 57,82 | 57,41 | 57,00 | 56,60 | 56,19 | -100 |
| -90 | 64,30 | 63,90 | 63,49 | 63,09 | 62,68 | 62,28 | 61,87 | 61,47 | 61,06 | 60,66 | 60,25 | -90 |
| -80 | 68,33 | 67,93 | 67,52 | 67,12 | 66,72 | 66,31 | 65,91 | 65,51 | 65,11 | 64,70 | 64,30 | -80 |
| -70 | 72,33 | 71,93 | 71,53 | 71,13 | 70,73 | 70,33 | 69,93 | 69,53 | 69,13 | 68,73 | 68,33 | -70 |
| -60 | 76,33 | 75,93 | 75,53 | 75,13 | 74,73 | 74,33 | 73,93 | 73,53 | 73,13 | 72,73 | 72,33 | -60 |
| -50 | 80,31 | 79,91 | 79,51 | 79,11 | 78,72 | 78,32 | 77,92 | 77,52 | 77,13 | 76,73 | 76,33 | -50 |
| -40 | 84,27 | 83,88 | 83,48 | 83,08 | 82,69 | 82,29 | 81,89 | 81,49 | 81,10 | 80,70 | 80,31 | -40 |
| -30 | 88,22 | 87,83 | 87,43 | 87,04 | 86,64 | 86,25 | 85,85 | 85,46 | 85,06 | 84,67 | 84,27 | -30 |
| -20 | 92,16 | 91,77 | 91,37 | 90,98 | 90,59 | 90,19 | 89,80 | 89,40 | 89,01 | 88,62 | 88,22 | -20 |
| -10 | 96,09 | 95,69 | 95,30 | 94,91 | 94,52 | 94,12 | 93,73 | 93,34 | 92,95 | 92,55 | 92,16 | -10 |
| 0 | 100,00 | 99,61 | 99,22 | 98,83 | 98,44 | 98,04 | 97,65 | 97,26 | 96,87 | 96,48 | 96,09 | 0 |
| 10 | 103,90 | 103,50 | 103,11 | 102,71 | 102,32 | 101,92 | 101,53 | 101,13 | 100,74 | 100,34 | 99,95 | 10 |
| 20 | 107,79 | 107,39 | 106,99 | 106,60 | 106,20 | 105,81 | 105,41 | 105,02 | 104,62 | 104,23 | 103,83 | 20 |
| 30 | 111,67 | 111,27 | 110,88 | 110,48 | 110,09 | 109,69 | 109,29 | 108,90 | 108,50 | 108,11 | 107,71 | 30 |
| 40 | 115,54 | 115,14 | 114,75 | 114,35 | 113,96 | 113,56 | 113,17 | 112,77 | 112,38 | 111,98 | 111,59 | 40 |
| 50 | 119,40 | 119,00 | 118,61 | 118,21 | 117,82 | 117,42 | 117,03 | 116,63 | 116,24 | 115,84 | 115,45 | 50 |
| 60 | 123,24 | 122,84 | 122,45 | 122,05 | 121,66 | 121,26 | 120,87 | 120,47 | 120,08 | 119,68 | 119,29 | 60 |
| 70 | 127,07 | 126,67 | 126,28 | 125,88 | 125,49 | 125,09 | 124,70 | 124,30 | 123,91 | 123,51 | 123,12 | 70 |
| 80 | 130,89 | 130,49 | 130,10 | 129,70 | 129,31 | 128,91 | 128,52 | 128,12 | 127,73 | 127,33 | 126,94 | 80 |
| 90 | 134,70 | 134,30 | 133,91 | 133,51 | 133,12 | 132,72 | 132,33 | 131,93 | 131,54 | 131,14 | 130,75 | 90 |
| 100 | 138,50 | 138,10 | 137,71 | 137,31 | 136,92 | 136,52 | 136,13 | 135,73 | 135,34 | 134,94 | 134,55 | 100 |
| 110 | 142,29 | 141,89 | 141,50 | 141,10 | 140,71 | 140,31 | 139,92 | 139,52 | 139,13 | 138,73 | 138,34 | 110 |
| 120 | 146,06 | 145,67 | 145,27 | 144,88 | 144,48 | 144,09 | 143,69 | 143,30 | 142,90 | 142,51 | 142,11 | 120 |
| 130 | 149,82 | 149,43 | 149,03 | 148,64 | 148,24 | 147,85 | 147,45 | 147,06 | 146,66 | 146,27 | 145,87 | 130 |
| 140 | 153,58 | 153,18 | 152,79 | 152,39 | 152,00 | 151,60 | 151,21 | 150,81 | 150,42 | 150,02 | 149,63 | 140 |
| 150 | 157,31 | 156,92 | 156,52 | 156,13 | 155,73 | 155,34 | 154,94 | 154,55 | 154,15 | 153,76 | 153,36 | 150 |
| 160 | 161,04 | 160,64 | 160,25 | 159,85 | 159,46 | 159,06 | 158,67 | 158,27 | 157,88 | 157,48 | 157,08 | 160 |
| 170 | 164,76 | 164,36 | 163,97 | 163,57 | 163,18 | 162,78 | 162,38 | 161,99 | 161,59 | 161,19 | 160,80 | 170 |
| 180 | 168,46 | 168,07 | 167,67 | 167,28 | 166,88 | 166,48 | 166,09 | 165,69 | 165,29 | 164,90 | 164,50 | 180 |
| 190 | 172,16 | 171,76 | 171,37 | 170,97 | 170,58 | 170,18 | 169,79 | 169,39 | 168,99 | 168,60 | 168,20 | 190 |
| 200 | 175,84 | 175,45 | 175,05 | 174,66 | 174,26 | 173,87 | 173,47 | 173,07 | 172,68 | 172,28 | 171,88 | 200 |
| 210 | 179,51 | 179,12 | 178,72 | 178,33 | 177,93 | 177,54 | 177,14 | 176,75 | 176,35 | 175,96 | 175,56 | 210 |
| 220 | 183,17 | 182,78 | 182,38 | 181,99 | 181,59 | 181,20 | 180,80 | 180,41 | 180,01 | 179,62 | 179,22 | 220 |
| 230 | 186,82 | 186,43 | 186,03 | 185,64 | 185,24 | 184,85 | 184,45 | 184,06 | 183,66 | 183,27 | 182,87 | 230 |
| 240 | 190,45 | 190,06 | 189,66 | 189,27 | 188,87 | 188,48 | 188,08 | 187,69 | 187,29 | 186,90 | 186,50 | 240 |
| 250 | 194,07 | 193,67 | 193,28 | 192,88 | 192,49 | 192,09 | 191,70 | 191,30 | 190,91 | 190,51 | 190,12 | 250 |
| 260 | 197,69 | 197,29 | 196,90 | 196,50 | 196,11 | 195,71 | 195,32 | 194,92 | 194,53 | 194,13 | 193,74 | 260 |
| 270 | 201,29 | 200,90 | 200,50 | 200,11 | 199,71 | 199,32 | 198,92 | 198,53 | 198,13 | 197,74 | 197,34 | 270 |
| 280 | 204,88 | 204,49 | 204,09 | 203,70 | 203,30 | 202,91 | 202,51 | 202,12 | 201,72 | 201,33 | 200,93 | 280 |
| 290 | 208,45 | 208,06 | 207,66 | 207,27 | 206,87 | 206,48 | 206,08 | 205,69 | 205,29 | 204,90 | 204,50 | 290 |
| 300 | 212,02 | 211,63 | 211,23 | 210,84 | 210,44 | 210,05 | 209,65 | 209,26 | 208,86 | 208,47 | 208,07 | 300 |
| 310 | 215,57 | 215,18 | 214,78 | 214,39 | 213,99 | 213,60 | 213,20 | 212,81 | 212,41 | 212,02 | 211,62 | 310 |
| 320 | 219,12 | 218,73 | 218,33 | 217,94 | 217,54 | 217,15 | 216,75 | 216,36 | 215,96 | 215,57 | 215,17 | 320 |

Esempio: PT100

- **PT100 = il Platino varia la sua resistenza al variare della temperatura ($\alpha = 0,0038501/^\circ$)**
 - **PT100 è la resistenza che vale 100 Ω a 0 $^\circ\text{C}$**
 - **T(-50 $^\circ\text{C}$) = 80,7495 Ω (80,31 da tabella)**
 - **T(50 $^\circ\text{C}$) = 119,2505 Ω (119,4 da tabella)**
 - **T(100 $^\circ\text{C}$) = 138,501 Ω (138,5 da tabella)**
 - **T(200 $^\circ\text{C}$) = 177,002 Ω (175,84 da tabella)**
 - **La caratteristica non è lineare (Carel PT100)**
 - **Limitazione del range o linearizz. a tratti**

| R | T | T* = RxA+B | | Range limitato T* = RxA+B | |
|--------|-----|------------|------------------|------------------------------|-----------------|
| 80,31 | -50 | -51,25923 | -1,25923 | -51,91773 | -1,917728 |
| 100 | 0 | 0,265003 | 0,265003 | -0,383778 | -0,383778 |
| 119,4 | 50 | 51,03037 | 1,030372 | 50,39116 | 0,391165 |
| 138,5 | 100 | 101,0107 | 1,01071 | 100,3809 | 0,380928 |
| 157,31 | 150 | 150,2322 | 0,232184 | 149,6117 | -0,388315 |
| 175,84 | 200 | 198,721 | -1,279038 | 198,1096 | -1,890393 |

2,616772 = PENDENZA(B3:B8;A3:A8) A
 -261,4122 =INTERCETTA(B3:B8;A3:A8) B

2,617265 = PENDENZA(B4:B7;A4:A7) A
 -262,1103 =INTERCETTA(B4:B7;A4:A7) B

| $^\circ\text{C}$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | $^\circ\text{C}$ |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| -200 | 18,49 | | | | | | | | | | | -200 |
| -190 | 22,80 | 22,37 | 21,94 | 21,51 | 21,08 | 20,65 | 20,22 | 19,79 | 19,36 | 18,93 | 18,49 | -190 |
| -180 | 27,08 | 26,65 | 26,23 | 25,80 | 25,37 | 24,94 | 24,52 | 24,09 | 23,66 | 23,23 | 22,80 | -180 |
| -170 | 31,32 | 30,90 | 30,47 | 30,05 | 29,63 | 29,20 | 28,78 | 28,35 | 27,93 | 27,50 | 27,08 | -170 |
| -160 | 35,53 | 35,11 | 34,69 | 34,27 | 33,85 | 33,43 | 33,01 | 32,59 | 32,16 | 31,74 | 31,32 | -160 |
| -150 | 39,71 | 39,30 | 38,88 | 38,46 | 38,04 | 37,63 | 37,21 | 36,79 | 36,37 | 35,95 | 35,53 | -150 |
| -140 | 43,87 | 43,45 | 43,04 | 42,63 | 42,21 | 41,79 | 41,38 | 40,96 | 40,55 | 40,13 | 39,71 | -140 |
| -130 | 48,00 | 47,59 | 47,18 | 46,76 | 46,35 | 45,94 | 45,52 | 45,11 | 44,70 | 44,28 | 43,87 | -130 |
| -120 | 52,11 | 51,70 | 51,29 | 50,88 | 50,47 | 50,06 | 49,64 | 49,23 | 48,82 | 48,41 | 48,00 | -120 |
| -110 | 56,19 | 55,78 | 55,38 | 54,97 | 54,56 | 54,15 | 53,74 | 53,33 | 52,92 | 52,52 | 52,11 | -110 |
| -100 | 60,25 | 59,85 | 59,44 | 59,04 | 58,63 | 58,22 | 57,82 | 57,41 | 57,00 | 56,60 | 56,19 | -100 |
| -90 | 64,30 | 63,90 | 63,49 | 63,09 | 62,68 | 62,28 | 61,87 | 61,47 | 61,06 | 60,66 | 60,25 | -90 |
| -80 | 68,33 | 67,93 | 67,52 | 67,12 | 66,72 | 66,31 | 65,91 | 65,51 | 65,11 | 64,70 | 64,30 | -80 |
| -70 | 72,33 | 71,93 | 71,53 | 71,13 | 70,73 | 70,33 | 69,93 | 69,53 | 69,13 | 68,73 | 68,33 | -70 |
| -60 | 76,33 | 75,93 | 75,53 | 75,13 | 74,73 | 74,33 | 73,93 | 73,53 | 73,13 | 72,73 | 72,33 | -60 |
| -50 | 80,31 | 79,91 | 79,51 | 79,11 | 78,72 | 78,32 | 77,92 | 77,52 | 77,13 | 76,73 | 76,33 | -50 |
| -40 | 84,27 | 83,88 | 83,48 | 83,08 | 82,69 | 82,29 | 81,89 | 81,49 | 81,10 | 80,70 | 80,31 | -40 |
| -30 | 88,22 | 87,83 | 87,43 | 87,04 | 86,64 | 86,25 | 85,85 | 85,46 | 85,06 | 84,67 | 84,27 | -30 |
| -20 | 92,16 | 91,77 | 91,37 | 90,98 | 90,59 | 90,19 | 89,80 | 89,40 | 89,01 | 88,62 | 88,22 | -20 |
| -10 | 96,09 | 95,69 | 95,30 | 94,91 | 94,52 | 94,12 | 93,73 | 93,34 | 92,95 | 92,55 | 92,16 | -10 |
| 0 | 100,00 | 99,61 | 99,22 | 98,83 | 98,44 | 98,04 | 97,65 | 97,26 | 96,87 | 96,48 | 96,09 | 0 |
| 10 | 103,90 | 103,50 | 103,11 | 102,71 | 102,32 | 101,92 | 101,53 | 101,13 | 100,74 | 100,34 | 99,95 | 10 |
| 20 | 107,79 | 107,39 | 106,99 | 106,60 | 106,20 | 105,81 | 105,41 | 105,02 | 104,62 | 104,23 | 103,83 | 20 |
| 30 | 111,67 | 111,27 | 110,87 | 110,48 | 110,08 | 109,68 | 109,29 | 108,89 | 108,49 | 108,10 | 107,70 | 30 |
| 40 | 115,54 | 115,14 | 114,74 | 114,35 | 113,95 | 113,55 | 113,16 | 112,76 | 112,36 | 111,97 | 111,57 | 40 |
| 50 | 119,40 | 119,00 | 118,60 | 118,21 | 117,81 | 117,41 | 117,02 | 116,62 | 116,23 | 115,83 | 115,43 | 50 |
| 60 | 123,24 | 122,84 | 122,44 | 122,05 | 121,65 | 121,25 | 120,86 | 120,46 | 120,06 | 119,67 | 119,27 | 60 |
| 70 | 127,07 | 126,67 | 126,27 | 125,87 | 125,48 | 125,08 | 124,68 | 124,28 | 123,89 | 123,49 | 123,09 | 70 |
| 80 | 130,89 | 130,49 | 130,09 | 129,69 | 129,29 | 128,89 | 128,49 | 128,09 | 127,69 | 127,29 | 126,89 | 80 |
| 90 | 134,70 | 134,30 | 133,90 | 133,50 | 133,10 | 132,70 | 132,30 | 131,90 | 131,50 | 131,10 | 130,70 | 90 |
| 100 | 138,50 | 138,10 | 137,70 | 137,30 | 136,90 | 136,50 | 136,10 | 135,70 | 135,30 | 134,90 | 134,50 | 100 |
| 110 | 142,29 | 141,89 | 141,49 | 141,09 | 140,69 | 140,29 | 139,89 | 139,49 | 139,09 | 138,69 | 138,29 | 110 |
| 120 | 146,06 | 145,66 | 145,26 | 144,86 | 144,46 | 144,06 | 143,66 | 143,26 | 142,86 | 142,46 | 142,06 | 120 |
| 130 | 149,82 | 149,42 | 149,02 | 148,62 | 148,22 | 147,82 | 147,42 | 147,02 | 146,62 | 146,22 | 145,82 | 130 |
| 140 | 153,58 | 153,18 | 152,78 | 152,38 | 151,98 | 151,58 | 151,18 | 150,78 | 150,38 | 149,98 | 149,58 | 140 |
| 150 | 157,31 | 156,91 | 156,51 | 156,11 | 155,71 | 155,31 | 154,91 | 154,51 | 154,11 | 153,71 | 153,31 | 150 |
| 160 | 161,04 | 160,64 | 160,24 | 159,84 | 159,44 | 159,04 | 158,64 | 158,24 | 157,84 | 157,44 | 157,04 | 160 |
| 170 | 164,76 | 164,36 | 163,96 | 163,56 | 163,16 | 162,76 | 162,36 | 161,96 | 161,56 | 161,16 | 160,76 | 170 |
| 180 | 168,46 | 168,06 | 167,66 | 167,26 | 166,86 | 166,46 | 166,06 | 165,66 | 165,26 | 164,86 | 164,46 | 180 |
| 190 | 172,16 | 171,76 | 171,36 | 170,96 | 170,56 | 170,16 | 169,76 | 169,36 | 168,96 | 168,56 | 168,16 | 190 |
| 200 | 175,84 | 175,44 | 175,04 | 174,64 | 174,24 | 173,84 | 173,44 | 173,04 | 172,64 | 172,24 | 171,84 | 200 |
| 210 | 179,51 | 179,11 | 178,71 | 178,31 | 177,91 | 177,51 | 177,11 | 176,71 | 176,31 | 175,91 | 175,51 | 210 |
| 220 | 183,17 | 182,77 | 182,37 | 181,97 | 181,57 | 181,17 | 180,77 | 180,37 | 179,97 | 179,57 | 179,17 | 220 |
| 230 | 186,82 | 186,42 | 186,02 | 185,62 | 185,22 | 184,82 | 184,42 | 184,02 | 183,62 | 183,22 | 182,82 | 230 |
| 240 | 190,45 | 190,05 | 189,65 | 189,25 | 188,85 | 188,45 | 188,05 | 187,65 | 187,25 | 186,85 | 186,45 | 240 |
| 250 | 194,07 | 193,67 | 193,27 | 192,87 | 192,47 | 192,07 | 191,67 | 191,27 | 190,87 | 190,47 | 190,07 | 250 |
| 260 | 197,69 | 197,29 | 196,89 | 196,49 | 196,09 | 195,69 | 195,29 | 194,89 | 194,49 | 194,09 | 193,69 | 260 |
| 270 | 201,29 | 200,89 | 200,49 | 200,09 | 199,69 | 199,29 | 198,89 | 198,49 | 198,09 | 197,69 | 197,29 | 270 |
| 280 | 204,88 | 204,48 | 204,08 | 203,68 | 203,28 | 202,88 | 202,48 | 202,08 | 201,68 | 201,28 | 200,88 | 280 |
| 290 | 208,45 | 208,05 | 207,65 | 207,25 | 206,85 | 206,45 | 206,05 | 205,65 | 205,25 | 204,85 | 204,45 | 290 |
| 300 | 212,02 | 211,62 | 211,22 | 210,82 | 210,42 | 210,02 | 209,62 | 209,22 | 208,82 | 208,42 | 208,02 | 300 |
| 310 | 215,57 | 215,17 | 214,77 | 214,37 | 213,97 | 213,57 | 213,17 | 212,77 | 212,37 | 211,97 | 211,57 | 310 |
| 320 | 219,12 | 218,72 | 218,32 | 217,92 | 217,52 | 217,12 | 216,72 | 216,32 | 215,92 | 215,52 | 215,12 | 320 |

SENSORI: CARATTERISTICHE STATICHE (1/2)

- ❑ **Range o span o portata o fondo scala (FS)**
intervallo dinamico di ingresso (massimo valore meno minimo valore) che può essere convertito dal sensore con una incertezza prestabilita
- ❑ **Full Scale Output (FSO)**
differenza fra i segnali di uscita del sensore quando ad esso sono applicati i valori estremi del range
- ❑ **Isteresi [%FSO]**
massima differenza tra i valori di uscita corrispondente ad uno stesso ingresso, ottenuto per valori crescenti e decrescenti.
- ❑ **Ripetibilità [entro....%FSO]**
capacità di riprodurre la stessa uscita quando è applicato lo stesso ingresso, consecutivamente, nelle stesse condizioni operative e nella stessa direzione.
E' espressa come massima differenza tra le uscite di più cicli di calibrazione.

SENSORI: CARATTERISTICHE STATICHE (2/2)

❑ Risoluzione o detectivity [%FSO]

- Rappresenta l'abilità del trasduttore nel rivelare il segnale di ingresso (limitata dal rumore da esso prodotto)
- minimo segnale rilevabile = segnale di ingresso I tale che $SNR_{uscita} = 1$
 $I = 0 \rightarrow$ solo rumore; minimo segnale rilevabile / Potenza(I) = Potenza(rumore)

❑ Linearità [entro $\pm \dots$ %FSO]

indica lo scostamento della curva di taratura sperimentale dalla retta di riferimento (r.r.) ottenuta dai dati sperimentali di calibrazione.

- Linearità terminale (r.r. per gli estremi)
- Linearità ai minimi quadrati (r.r. ottenuta con il metodo dei minimi quadrati)
-

❑ Sensibilità [...%] (sensitivity o responsivity o costante di trasduzione)

- rapporto tra il segnale di uscita e la grandezza trasdotta calcolata sulla r.r.
- sensibilità traversa verso altre grandezze (cross sensitivity)
- Offset = segnale di uscita in assenza di stimolo

SENSORI: ACQUISIZIONE

- **Esempio1: sensore di temperatura con uscita $V(T) = 1V + (50mV/^\circ C) * (T - 20^\circ C)$**
- **Acquisisco V in Volt e devo calcolare T in $^\circ C$**
 - **$T = 20^\circ C + (V - 1V) / (50mV/^\circ C)$ $T = T_o + (V - V_o) / S$**
 - **Devo dimensionare il range del segnale da acquisire (V_{min} , V_{max}) sulla base di T_{max} e T_{min} ($T_{max} = T_o + (V_{max} - V_o) / S$). Se il mio sistema di acquisizione acquisisce tra $V1$ e $V2$ si deve avere $V1 < V_{min}$ a $V2 > V_{max}$**
 - **Devo dimensionare la risoluzione del sistema di acquisizione ($n =$ numero bit)
La risoluzione in Volt è pari $dV = (V2 - V1) / 2^n$, la risoluzione in $^\circ C$ è $dT = dV / S$**
 - **Si fissa la risoluzione di poco migliore (stesso ordine di grandezza) rispetto a linearità, ripetibilità, incertezza sui valori di S , T_o , V_o ,...**
- **Esempio2: sensore non lineare calibrato per punti (T_j , V_j) -> linearizzazione a tratti**
- **All'inizio si costruisce una tabella a due colonne V_j e T_j .
Si misura la tensione V e si trova $i / V_i < V < V_{i+1}$
 $T = T_i + (V - V_i) * (T_{i+1} - T_i) / (V_{i+1} - V_i)$**
 - **Per evitare la divisione è meglio utilizzare una tabella a 3 colonne V_i , T_i , S_i
 $S_i = (T_{i+1} - T_i) / (V_{i+1} - V_i)$ e si calcola $T = T_i + (V - V_i) * S_i$**

SENSORI: ACQUISIZIONE

□ **Esercizio:**

Sensore resistivo di temperatura: $R[\text{Ohm}] = 1200 + k(T-273)$, dove $k=2 \text{ Ohm}/^\circ\text{C}$ nel range $[0-200^\circ\text{C}]$ e T è espressa in $^\circ\text{C}$.

Il sensore è alimentato a $VCC=10\text{V}$ e il segnale in corrente $I=VCC/R$ viene portato ad un ingresso analogico in corrente che restituisce $0x0000$ se la corrente è 0mA e $0x3fff$ se la corrente è 20mA .

- **Come calcolo T in $^\circ\text{C}$? Qual'è il range numerico?**
- **Apprezzo il centesimo di grado? Qual'è la risoluzione in $^\circ\text{C}$?**

□ **Soluzione:**

- **Il numero N che leggo è proporzionale alla corrente I ($I = 20\text{mA} * N / 2^{14}$)**
- **La resistenza R si ricava dalla corrente I ($R = 10\text{V} / I = 500\text{Ohm} * 2^{14} / N$)**
- **La temperatura T si ricava da R , ossia $T = 273 + (R - 1200) / k = 273 + 250(2^{14} / N - 2.4)$**
 $T_{\min} = 0^\circ\text{C}$, $R_{\min} = 654$, $I_{\max} = 15,29\text{mA}$, $N_{\max} = 12526 = 30\text{EEh}$
 $T_{\max} = 200^\circ\text{C}$, $R_{\max} = 1054$, $I_{\min} = 9,48\text{mA}$, $N_{\min} = 7772 = 1\text{E5Ch}$
 $\Delta N = 1$, $\Delta I = 20\text{mA} / 2^{14} = 1,2\mu\text{A}$, $\Delta R = (10\text{V} / I_{\min}) - (10\text{V} / (I_{\min} + \Delta I)) = 0,13\Omega$, $\Delta T = \Delta R / k = 0,067^\circ\text{C}$

SENSORI: CARATTERISTICHE STATICHE, RIEPILOGO

- ❑ Al progettista di automazione sono date le specifiche di misura della grandezza M
 - M_{\min} , M_{\max} , dM (dM = risoluzione della misura, minima variazione apprezzabile)
- ❑ Il progettista sceglie il sensore con caratteristica $Out=Out(M)$ sulla base di:
 - Linearità nel range tra M_{\min} e M_{\max} ($Out=a \cdot M+b$)
 - Sensibilità (il coeff. a deve essere abbastanza elevato in modo da apprezzare dM , ossia $dOut=a \cdot dM$ deve essere “facilmente misurabile”)
 - Ripetibilità (l'errore di ripetibilità deve essere inferiore a $dOut=a \cdot dM$)
 - Risoluzione (la risoluzione del sensore deve essere migliore di dM)
 - M_{\min} , M_{\max} , dM (dM = risoluzione della misura, minima variazione apprezzabile)
- ❑ Sceglie il modulo del PLC (ingresso In , out $N=2^n(In-In_{\min})/(In_{\max}-In_{\min})$ in modo che:
 - Gli ingressi In siano adatti a Out_{\min} e Out_{\max} senza perdita di range ($In_{\min}<Out_{\min}$ e $Out_{\max}<In_{\max}$ ma $(Out_{\max}-Out_{\min})/(In_{\max}-In_{\min})>1/2^m$ con m piccolo (tip. $m<3$)
 - Il numero di bit n sia adeguato a dM , ossia $(In_{\max}-In_{\min})/2^n < dOut = a \cdot dM$
- ❑ Programma il PLC misurando N e stimando $\langle M \rangle = \left(\frac{N(In_{\max} - In_{\min})}{2^n} - b \right) \frac{1}{a}$

SENSORI: CARATTERISTICHE DINAMICHE

- ❑ **Le caratteristiche dinamiche in un sensore descrivono il suo comportamento in condizioni di variazioni (rapide) dell'ingresso con il tempo.**
 - **Tempo di risposta del sensore -> “errore”**

- ❑ **Risposta in frequenza [\pm ..% da ..a..Hz]**
variazione del rapporto fra ampiezza di uscita e di ingresso (differenza fra fase di ingresso e di uscita) al variare della frequenza entro una prefissata banda

- ❑ **Risposta nel tempo [s]**
Caratterizza la risposta del dispositivo ad una variazione dell'ingresso con il tempo
 - **Tempo di risposta = tempo in cui l'uscita raggiunge 95% o 98% del valore finale**
 - **Tempo di salita = tempo in cui l'uscita va dal 10% al 90% del valore finale**
 - **Costante di tempo = tempo in cui l'uscita raggiunge il 63% del valore finale**

SENSORI: CARATTERISTICHE AMBIENTALI E DI AFFIDABILITA'

- ❑ **Errore di temperatura [%FSO]**
massimo scostamento dell'uscita a parità di ingresso al variare della temperatura in un determinato range

- ❑ **Errore di vibrazioni [%FSO]**
massimo scostamento dell'uscita a parità di ingresso quando al sensore sono applicate vibrazioni di ampiezza e frequenza prefissate

- ❑ **Affidabilità**
 - **MTBF (Mean Time Between Failure) -> tempo medio al guasto**
 - **Tempo medio al degrado (degrado = mancata osservanza di alcune caratteristiche di funzionamento)**

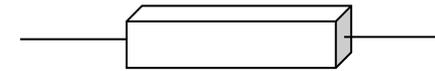
SENSORI RESISTIVI (*)

❑ La variazione del misurando genera una variazione di resistenza



❑ La resistenza R [Ω] di un parallelepipedo è $R = \rho * l / s$

- ρ è la resistività del materiale [$\Omega * m$] e $\rho = \rho(T)$
- l è la lunghezza [m]
- s la sezione [m^2]



❑ Sensori a variazione di:

- lunghezza (Es. potenziometri)
- resistività per effetti termici (termoresistori Es. PT100)
- resistività per mobilità dei portatori (sensori chimici)
- lunghezza e sezione (Es. estensimetri)

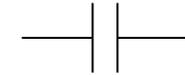
❑ Elettronica di condizionamento:

- Applico corrente e misuro tensione
- Inserzione in schemi a ponte
- Rumore $v^2 = 4kTR\Delta f$ ($k = 1.38 * 10^{-23} JK^{-1}$, Δf = banda della misura)

NOTA: se uso la tensione del sistema di acquisizione ho una misura raziometrica

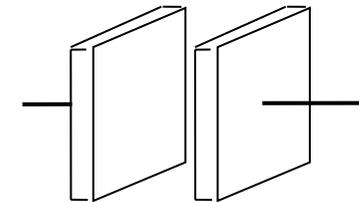
SENSORI CAPACITIVI (*)

□ La variazione del misurando genera una variazione di capacità



□ La capacità C [F] di un condensatore a facce piane è $C=Q/V=\epsilon_0\epsilon_r A/d$

- ϵ_0 è la permittività assoluta (costante dielettrica)
- ϵ_r è la permittività relativa del mezzo tra le armature
- A è l'area delle facce [m^2]
- d è la distanza tra le facce [m]



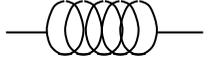
□ Sensori a variazione di:

- distanza d , area A (Es. sensori di spostamento lineare/angolare)
- permittività relativa ϵ_r (Es. sensori chimici, di umidità, di livello)
 - nota: $\epsilon_r = \epsilon_r (T, f)$
 - ϵ_r decresce al crescere della temperatura T o al crescere della frequenza f

□ Elettronica di condizionamento:

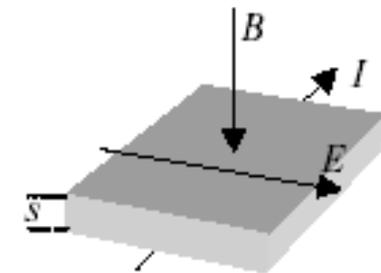
- Inserimento in circuiti oscillanti

SENSORI INDUTTIVI (*)

- ❑ **La variazione del misurando genera una variazione di induttanza** 
- ❑ **Se subiscono una variazione di corrente dI , gli induttori rispondono con una forza elettromotrice V che si oppone a dI in modo proporzionale all'induttanza $L[H]$, secondo la legge $V=-Ldi/dt$**
- ❑ **Per un induttore $L=\mu_0\mu_r A *n^2/l$**
 - $\mu_0=4\pi*10^{-7}$ H/m è la permeabilità assoluta del vuoto
 - μ_r è la permeabilità relativa del nucleo
 - n è il numero delle spire
 - A è la sezione [m²]
 - l lunghezza dell'induttore [m]
- ❑ **Sensori a variazione di:**
 - **dimensioni, numero di spire o μ_r del nucleo (Es. sensori di spostamento)**
- ❑ **Elettronica di condizionamento: (circuiti oscillanti)**

SENSORI MAGNETICI (*)

- ❑ **La variazione del misurando genera una variazione di campo magnetico o di f.e.m.**
- ❑ **Sensori basati sul principio del generatore (legge di Faraday)**
 - **Noto B e la lunghezza l del conduttore, misurando f.e.m. stimo la velocità v**
- ❑ **Sensori magnetostrittivi**
(I materiali magnetostrittivi sottoposti a campo magnetico subiscono variazioni dimensionali) -> sensori di forza, di spostamento
- ❑ **Sensori magnetoresistivi**
(I materiali magnetoresistivi sottoposti a campo magnetico variano la resistenza)
- ❑ **Sensori Hall (campo magnetico, posizione, corrente)**
(se in un conduttore di spessore s viene fatta passare una corrente I perpendicolare ad un campo magnetico esterno B , si genera una differenza di potenziale $E = K * I * B / s$)
- ❑ **Sensori di prossimità (proximity)**
(Se un oggetto metallico entra nel campo del sensore, si attiva un'uscita logica)



SENSORI PIEZOELETTRICI (*)

- **L'effetto piezoelettrico (*piezo=fare pressione*) descrive la caratteristica di alcuni materiali di generare cariche elettriche quando sono sottoposti a sollecitazioni**
 - **Forza -> deformazione del reticolo -> eccesso di carica superficiale -> f.e.m.**
 - **Effetto reversibile**
 - **I materiali sono elettricamente neutri in assenza di variazioni di sollecitazioni**
 - **Sensori di forza, pressione, spostamento**
 - **Elevata sensibilità alla temperatura**

SENSORI TERMOELETTRICI (*)

- **Sensori di temperatura**
 - **Sensori termoresistivi (PT100, PT1000)**
 - **Sensori basati sull'effetto Seebeck, Peltier, Thomson**

La variazione di temperatura si traduce in variazione di f.e.m. (Es. termocoppia)

SENSORI CHEMIELETTRICI (*)

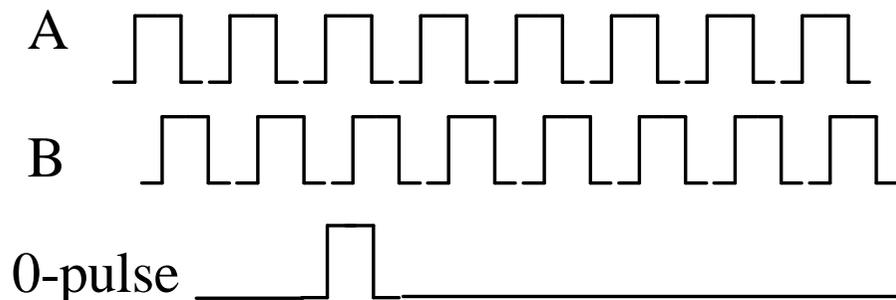
- **Descrivono la proprietà di alcuni elementi o composti di variare le proprie caratteristiche elettriche quando sono interessati da particolari reazioni chimiche**
 - **Utilizzati per rilevare la presenza e la concentrazione di specifiche sostanze**

SENSORI FOTOELETTRICI (*)

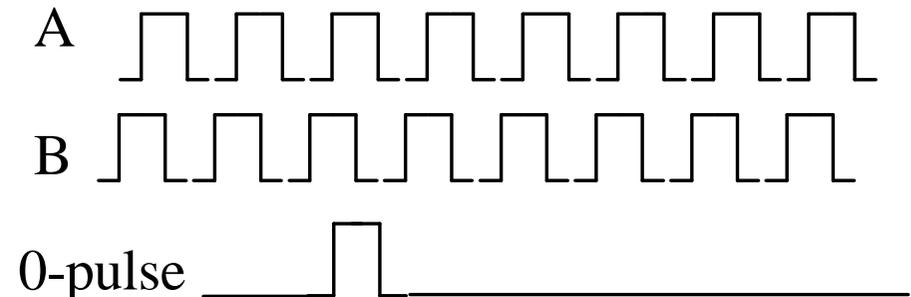
- **L'effetto fotoelettrico descrive la peculiarità dei materiali o di emettere elettroni o di variare la propria conducibilità quando assorbono energia luminosa**
 - **Fotone -> generazione di elettroni liberi (effetto fotoelettrico)**
 - **Fotone -> aumento conduttività (effetto fotoconduttivo)**
 - **Fotone -> comparsa di f.e.m. (effetto fotovoltaico)**
 - **Sensori di luce (esposimetri), fotodiodi, fototransistori, cellule fotoelettriche utilizzati per rilevazione di luce per stime di distanza, presenza**

ENCODER OTTICI INCREMENTALI

- ❑ **Misure di posizione e velocità**
- ❑ **Dispositivi che forniscono un segnale ad onda quadra con m impulsi per ogni giro**
 - **velocità angolare = w -> frequenza di uscita = $m*w$**
 - **3 segnali di uscita:**
 - **due segnali in quadratura per posizione, velocità e verso di rotazione**
 - **un impulso di zero per la ricostruzione della posizione assoluta**
 - **elettronica di condizionamento veloce (circuiti di conteggio)**



AVANTI



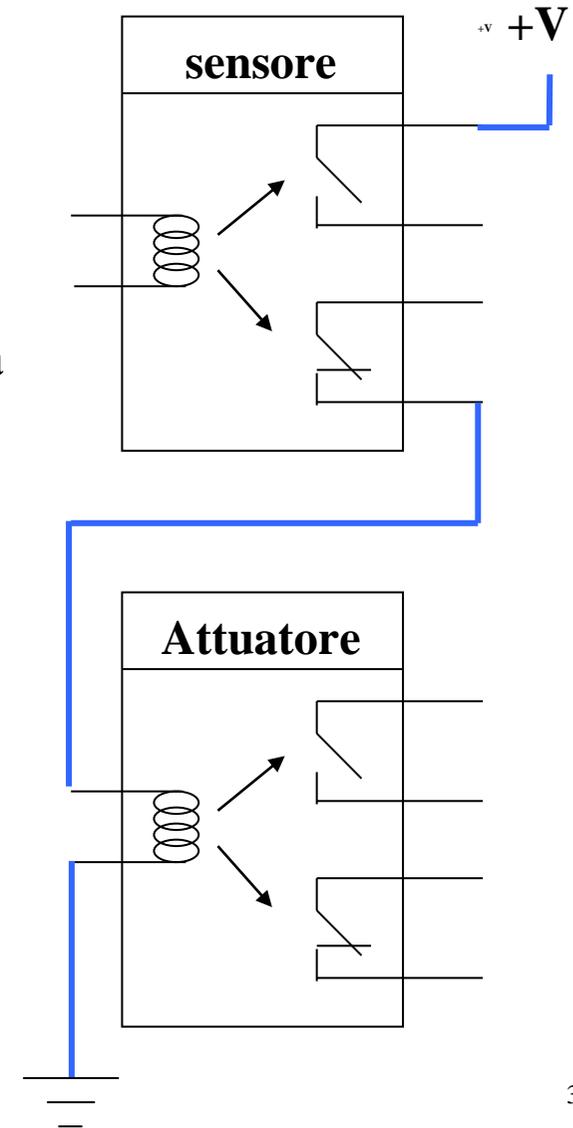
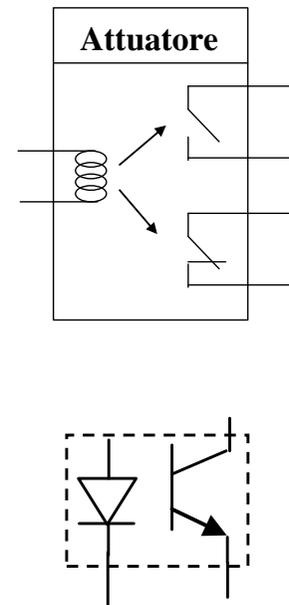
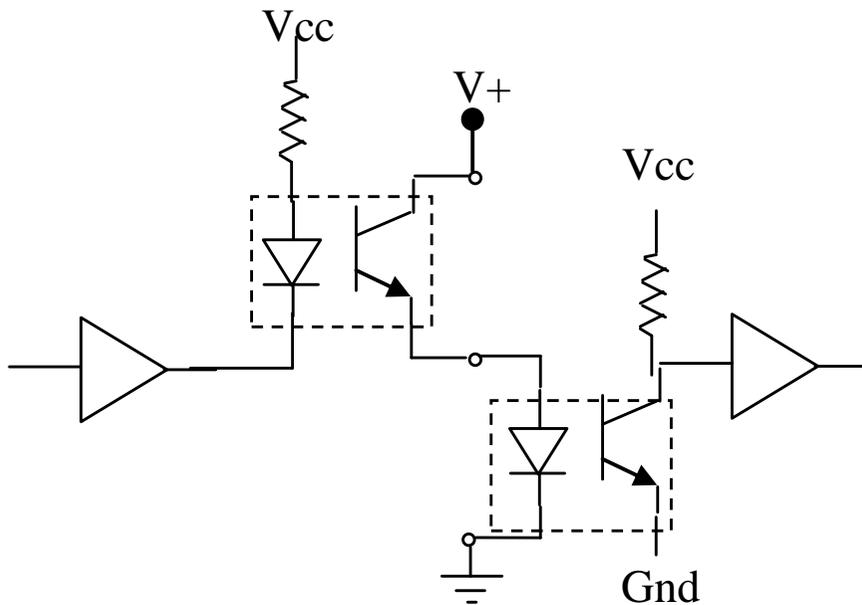
INDIETRO

- ❑ **Elettronica di condizionamento: contatori**

MODALITA' DI INTERFACCIAMENTO DI SENSORI/ATTUATORI

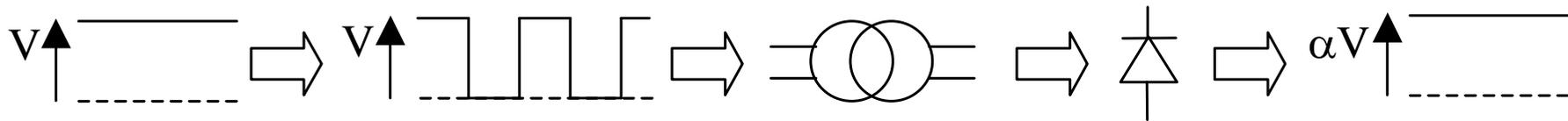
□ Sensori/attuatori discreti (ON/OFF)

- **Applico tensione e verifico passaggio di corrente**
- **Facile da trasmettere, facile da isolare**
- **Il relais è ingombrante, lento e dissipativo**
- **L'isolatore galvanico isola (1500V) ma ha meno potenza**



MODALITA' DI INTERFACCIAMENTO DI SENSORI/ATTUATORI

- ❑ **Sensori/attuatori continui (uscita 0-5V)**
 - **Difficile da isolare e da trasmettere**



- ❑ **Sensori/attuatori continui (uscita 4-20mA)**
 - **la trasmissione in corrente, rispetto a quella in tensione, è più robusta**
 - **integra la diagnostica verso la situazione di strappo cavi**
- ❑ **Sensori/attuatori continui (uscita in frequenza o in duty cycle)**
 - **il segnale da trasmettere è “digitale” ma richiede circuiti di misura del tempo e della frequenza (contatori veloci)**

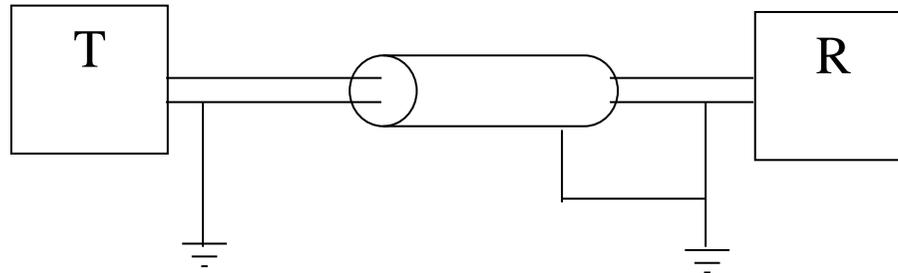
MODALITA' DI INTERFACCIAMENTO DI SENSORI/ATTUATORI: LA DIAGNOSTICA

- ❑ **La connessione di un sensore non è “per sempre”**
 - **Il sensore si può rompere e**
 - **Deve poter essere sostituito (plug&play) anche se con diversa caratteristica**
 - **Devo poter distinguere le lavorazioni fatte con il “vecchio” dal “nuovo”**
 - ...
- ❑ **Durante la fase operativa di lavoro**
 - **Un sensore di temperatura trasmette solo la temperatura e non riceve comandi**
- ❑ **Durante la messa in servizio e/o la diagnostica**
 - **Un sensore di temperatura può comunicare la sua identificazione, la T_{min} associata a 4mA e la T_{max} (20mA)**
- ❑ **Una trasmissione numerica punto-a-punto (tipo USB) implica un protocollo comune ed è più costosa di un'interfaccia 4-20mA**

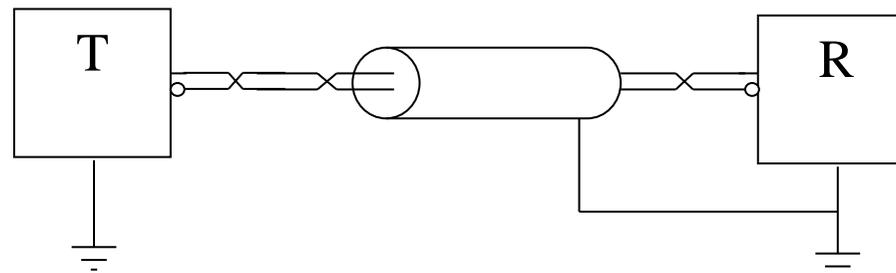
Serve una semplice interfaccia numerica a basso costo

MEZZI TRASMISSIVI: doppino intrecciato (*)

- ❑ **Trasmissione in tensione (può esservi sbilanciamento tra le masse)**



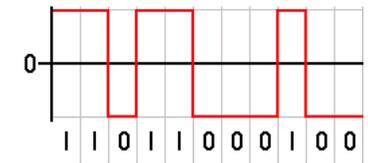
- ❑ **Trasmissione in corrente bilanciata (tanta corrente esce, tanta corrente entra)**
 - **Basso costo**
 - **Trasmissione/ricezione differenziale (immune ai disturbi di modo comune)**
 - **Buona immunità al rumore elettromagnetico se intrecciato e schermato**
 - **Richiede la trasmissione della massa per sicurezza**
 - **Utilizzato nei sistemi di comunicazione seriale di tipo UART (es. RS485)**



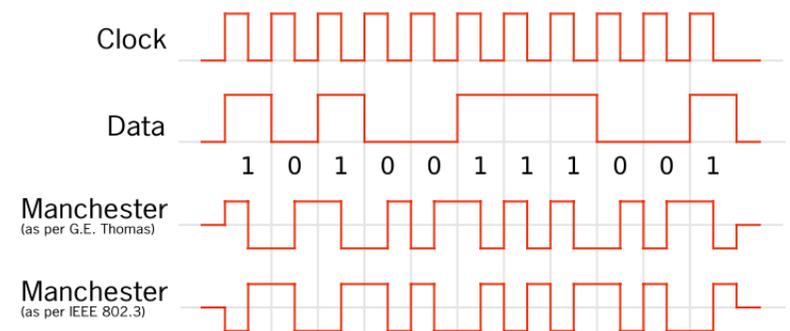
L'INTERFACCIA UART: RS232, RS485 (*)

- ❑ L'interfaccia UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) è presente in molti microcontrollori ed è considerata l'interfaccia numerica più semplice
 - L'informazione è un byte, preceduto da uno StartBit (=0) e seguito da un opzionale bit di parità (pari o dispari) e da un bit di Stop (=1)

- ❑ L'interfaccia UART nei processori è normalmente implementata in codifica Non Return to Zero



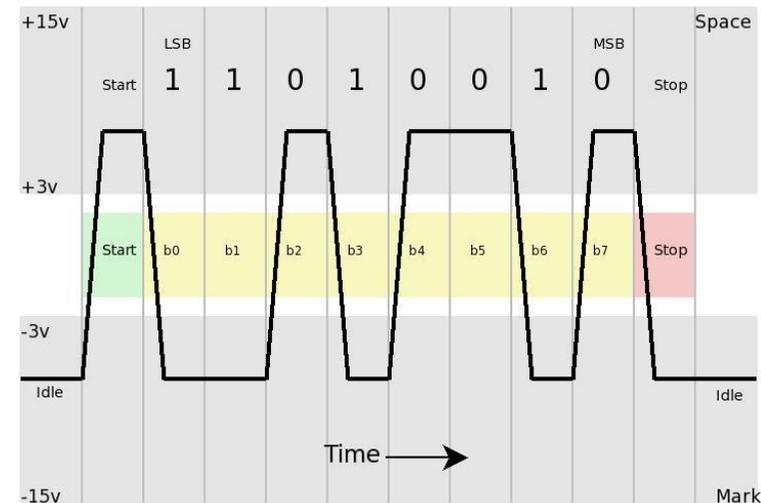
- “0” = segnale a massa per un tempo di bit Tbit
- (Bitrate=1/Tbit)
- “1” = segnale a Vcc (5V, 3.3V,..) per Tbit
- Ma ci possono essere altri modi di codifica
- (es. Manchester



- ❑ La codifica NRZ è incompatibile con la trasmissione su alcuni mezzi trasmissivi (es. fibra ottica) e ha una componente continua (non può essere “filtrata”)
 - E' usata nella RS232 e nella RS485

STANDARD EIA RS232 (*)

- ❑ Uno degli standard più “datati” (1969, RS232c CCITT V.24) e longevi
- ❑ Definisce l’interfaccia tra un DTE (Data Terminal Equipment -Es. una stampante-) e un DCE (Data Communication Equipment -Es. un'interfaccia su una rete di comunicazioni a maggiore complessita')
- ❑ Prevede un “handshake” hardware per il controllo di flusso della comunicazione (linee Request-to-send, Clear-to-send, Data-terminal-ready,...)
 - poco utilizzato (più utilizzati i protocolli SW –Es. XON/XOFF-)
- ❑ Trasmissione asincrona punto-a-punto
- ❑ Modalità prevalente: “full duplex”
Max 15m, max 19200baud
- ❑ Trasmissione in tensione a 12V
(Mark = da -15V a -3V)



RS422A (1976) (*)

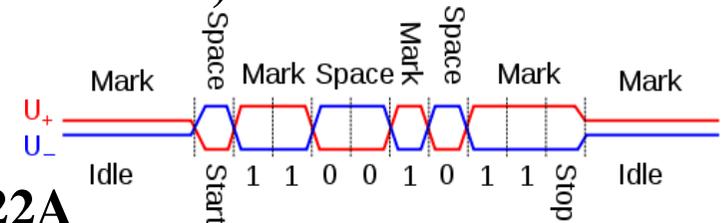
- ❑ **Trasmissione differenziale su doppino intrecciato (+Tx, -Tx) con linea di massa**
- ❑ **Livello di “SPACE” (“0”) = (+Tx=+5V, -Tx=0V)**
Livello di MARK (“1”) = (+Tx=0V, -Tx=+5V)
- ❑ **Lunghezza massima del collegamento = 1200m (f<100kHz)**
- ❑ **Frequenza massima di trasmissione = 10MHz (L<10m)**
(Fmax dipende da Trise –Fmax<0.1/Trise- , che dipende da Cl, che dipende da L)
- ❑ **Connettore non specificato (Tip. DB15), Full-duplex**
- ❑ **Driver (Es. 3487)**
 - **FAN-OUT = 10 (uscite 3-state non protette, Isc,max = 0.15mA)**
 - **Impedenza di carico = 100Ω**
- ❑ **Receiver (Es. 3486)**
 - **Sensibilità alla commutazione di circa ±200mV**

RS485A, CCITT V11 (1983, MOLTO USATO ANCORA OGGI) *

❑ **Compatibile con RS422A, utilizzato in SCSI-2 e SCSI-3 (Small Computer System Interface, hard disk)**

❑ **Dedicato alla multiutenza (32 drivers + 32 receivers) protezione conflitto tx (limitazione corrente, shutdown termico)**

❑ **Applicazioni full-duplex e, soprattutto, half-duplex**

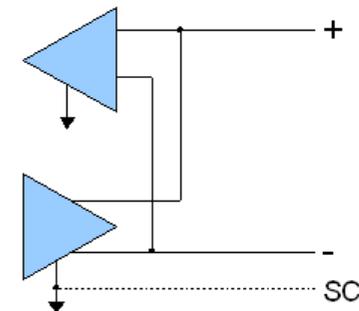


❑ **Frequenza massima di trasmissione e lunghezza RS422A ($F_{max} < 0.3/T_{rise}$, rispetto a RS422A consente fronti meno ripidi)**

❑ **Connettore non specificato (Tip. DB15)**

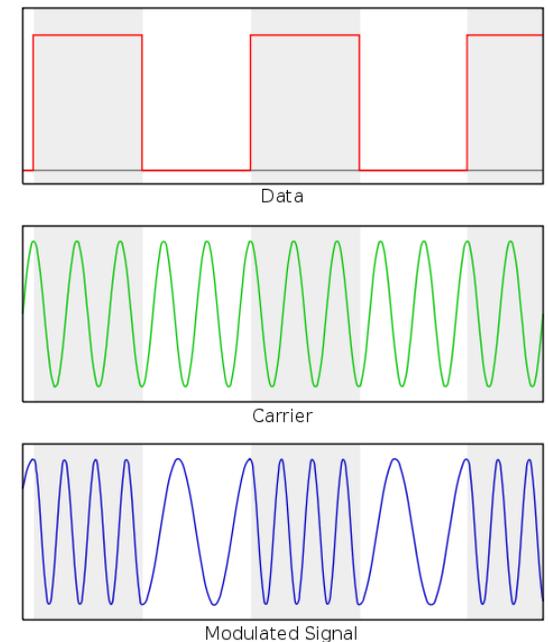
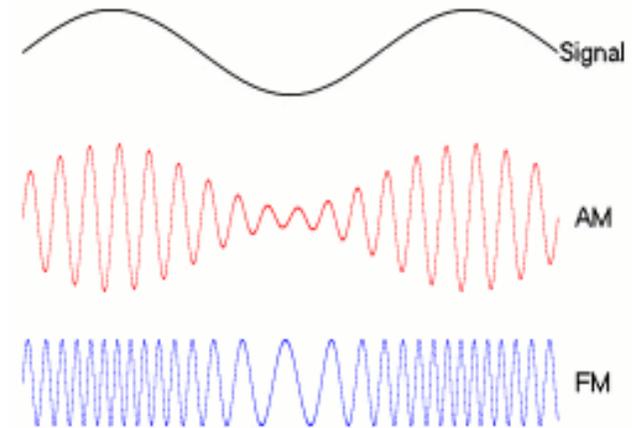
❑ **Transceiver (Es. 74176) (opera in tre modalità - 2 linee di controllo -):**

| Enable | Direction | Modalità |
|--------|-----------|-----------------------------------|
| 0 | X | alta impedenza |
| 1 | 0 | ricevitore |
| 1 | 1 | trasmettitore (3-state abilitato) |



MODULAZIONI (*)

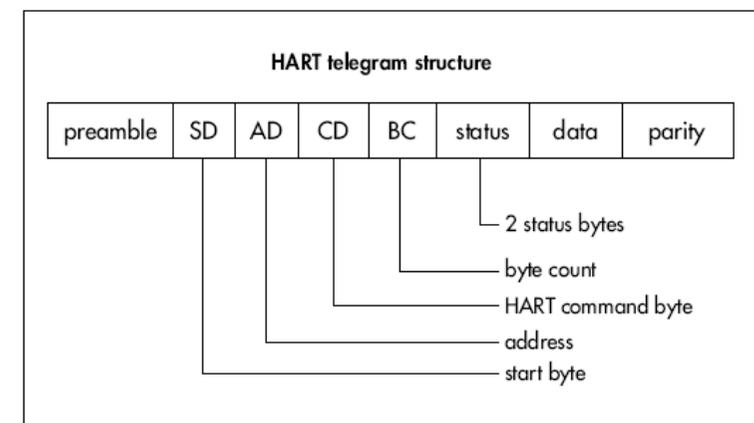
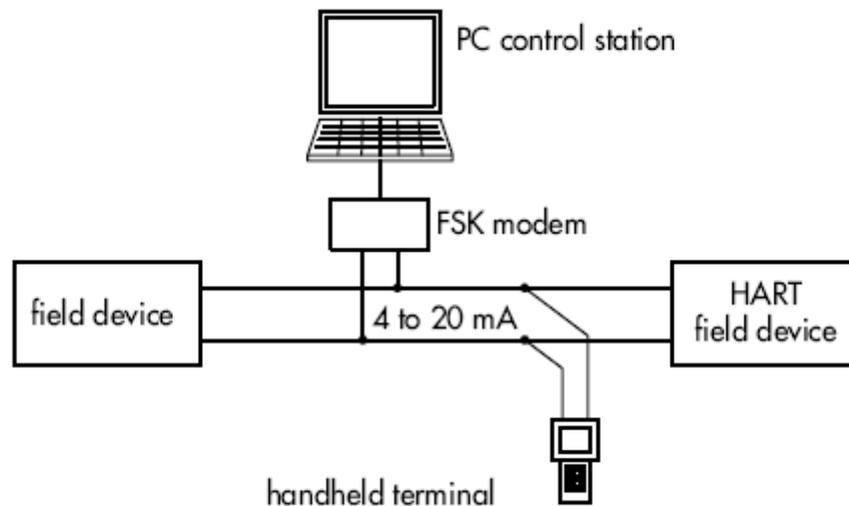
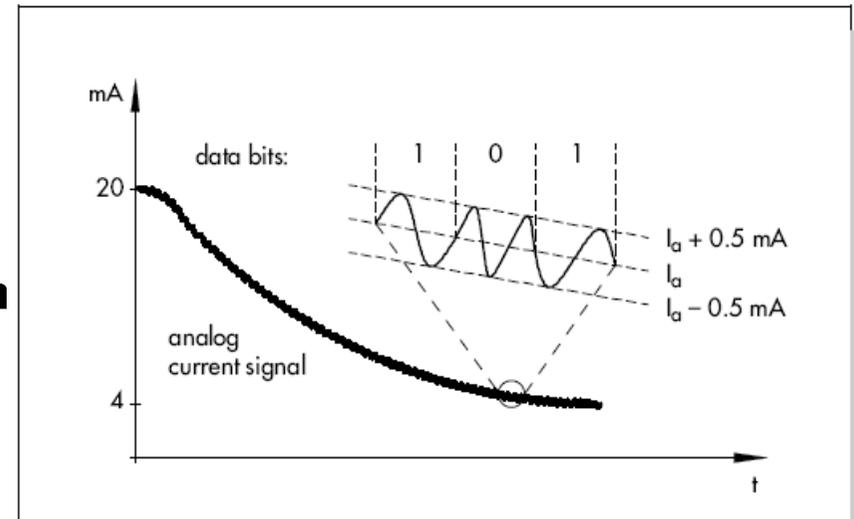
- ❑ **Modulazione di ampiezza (AM)**
 - **Facile, poco immune ai disturbi, sensori**
- ❑ **Modulazione di frequenza (FM)**
 - **Facile, immune ai disturbi, potenza portante**
- ❑ **Modulazione di fase (PM)**
 - **Complicata, poco usata**
- ❑ **Modulazione digitale di ampiezza (Amplitude-Shift Keying)**
 - **Facile, poco immune ai disturbi, fibra ottica (on-off-keying)**
- ❑ **Modulazione digitale di frequenza (Frequency-Shift Keying)**
 - **Facile, immune ai disturbi**
 - **Variante MSK (Minimum-shift keying)**
 - **“ammorbidisce” i salti di frequenza**



INTERFACCIA HART: il primo successo http://it.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_what.html

□ Sovrappone alla trasmissione analogica 4-20mA una trasmissione UART a 11bit

- Trasmissione dati diagnostici/configurazione
- Modem FSK (Frequency Shift Keying)
- “0”: 2200Hz, “1”: 1200Hz
- Data rate: 1200bit/s, fino a 15 dispositivi
- ~500ms per master telegram + slave telegram
- Oggi wirelessHART e bus di campo



USCITA DEL SENSORE E SISTEMA DI ELABORAZIONE

❑ Sensori “grezzi”

- resistenza
- capacità
- induttanza
- tensione AC o DC
- corrente AC o DC
-

❑ Sensori “condizionati”

- tensione 0-10V, 0-5V, $2V \pm 1V$, ...
- corrente 0-20mA, 4-20mA
- frequenza

❑ Sensori “intelligenti”

- uscita seriale SPI, I²C, RS232 o RS485
- bus di campo
- USB, Ethernet, wireless

Esempio: termoresistore

Esistono vari tipi di sensori basati sullo stesso elemento sensibile

1) termoresistore di valore

- 100Ω a 0°C , - 138Ω a 100°C
- costo: 1 euro (non calibrato)

2) Strumento con uscita in tensione

- 1 V a 0°C
- 1.5 V a 100°C
- costo: 10 euro

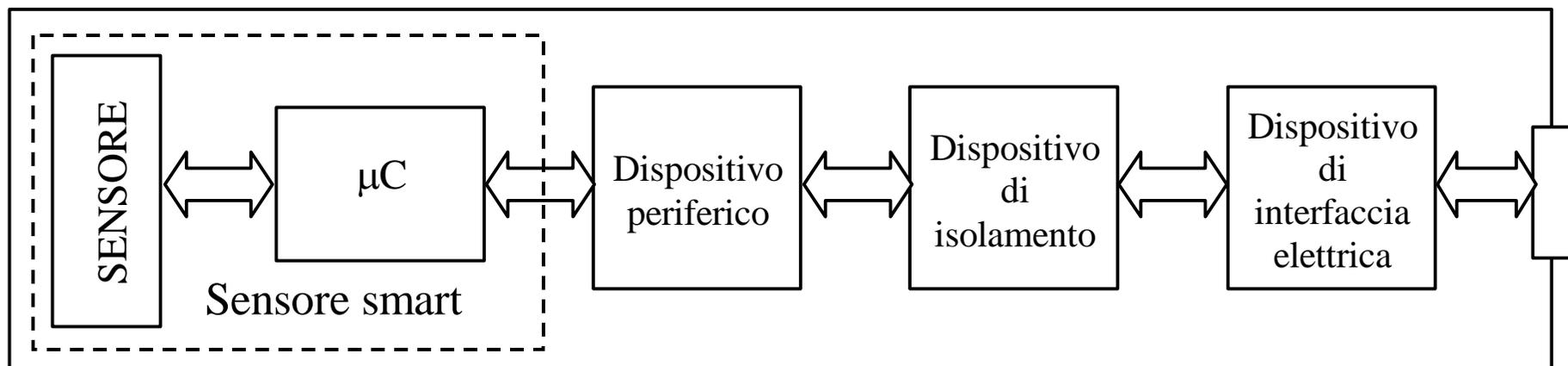
3) Strumento con uscita su bus di campo

- 0.00 a 0°C
- 100.00 a 100°C
- costo: 50 euro

NOTA: il PLC ha moduli di ingresso 0-10V (si provi a calcolare la risoluzione in gradi)

SENSORI SMART E BUS DI CAMPO

- ❑ Il sensore dispone già di un microcontrollore (μC)
 - Il μC è a basso costo e compensa le “imperfezioni” del sensore (es. linearità)
- ❑ Il sensore smart ha un microcontrollore (μC) e un’interfaccia di comunicazione
 - Bus di campo -> semplice protocollo -> gestibile dallo stesso μC
 - Bus di campo diffuso -> disponibilità di dispositivi periferici a basso costo
 - Limitati costi HW diretti (costi indiretti, peso del protocollo sul μC)
 - Gestibile a livello di opzione



INTERFACCE SU BUS DI CAMPO x SENSORI TRADIZIONALI

□ Moduli “concentratori” (Ingressi/uscite remotati)

- **Dispositivi che acquisiscono il sensore con uscita analogica (0-5V, 4-20mA,..) proprio come un modulo locale di ingressi analogici, lo convertono in digitale, incapsulano l’informazione in un protocollo di comunicazione –il bus di campo- e inviano al PC che riceve e mette a disposizione le informazioni su IPI**
- **E’ ben diverso da un sensore smart**
 - **No diagnostica**
 - **No altre informazioni**



BUS DI CAMPO

- ❑ **IEC61158: normativa a livello internazionale (supporta più tipologie)**
 - **Comunicazioni tra PLC, sensori e attuatori**
 - **Architetture master-slave (distribuzione degli I/O e più che dell'elaborazione)**
 - **Determinismo, ossia ridotto tempo di latenza della risposta**
 - **Messaggistica semplice (tip. <10 bytes)**
 - **Numero utenti limitato (~10)**
 - **Definiti ai livelli ISO/OSI 1,2,7**
 - **Semplici algoritmi di autodiagnostica e autoconfigurazione**
 - **Primi bus di campo proprietari negli anni '80**
 - **Proliferazione di soluzioni incompatibili tra loro.... E i costruttori di sensori?**

- ❑ **Sensore con varie possibilità di bus di campo e... 4-20mA**

PLURALITA' DEI BUS DI CAMPO

- ❑ **Ogni costruttore di componenti per l'automazione ha creato il suo bus di campo "imponendolo" come standard sulla base della sua forza di mercato**
- ❑ **BitBus IEEE 1118, 1991, 1200m a 375kbit/s, 28 users**
(Sfrutta il protocollo SDLC di Ethernet e quindi vi si interfaccia "naturalmente")
- ❑ **Interbus-S DIN 19258, 1984, 400m/stazione a 500kbit/s, 256 users**
(Struttura ad anello invece che a stella, autoconfigurazione)
- ❑ **Lon Works, 1991, 2km a 1.25Mbit/s, 100 "nodi"**
(Struttura neuronale –processori paralleli-, riguarda tutti i livelli ISO-OSI)
- ❑ **WorldFIP, EN 50170, 1988, 750m a 1Mbit/s**
(Trasmette anche su onde radio)
- ❑ **.... NOTE: www.interfacebus.com**

NORMATIVE (*)

- ❑ **IEC 61158 (Fieldbus standard for use in industrial control system)**
 - **61158-2 Regolamentazione del livello fisico (ottimo per controllo di processo)**
 - **61158-3 Regolamentazione del livello dati (DLL)**
 - **IEC 61158-3**
 - **ControlNet**
 - **Profibus**
 - **P-NET**
 - **Fieldbus Foundation –High Speed Ethernet**
 - **SwiftNet**
 - **Worldfip**
 - **Interbus**
 - **?**

- ❑ **IEC 62026 (Low voltage switchgear and controlgear –Controller/Device Interface-)**
 - **AS-I, DeviceNet, Smart Distributed Systems**

- ❑ **...e vi sono altre normative per le soluzioni basate su Ethernet/Internet**

NON E' POSSIBILE AVERE UN UNICO BUS DI CAMPO

Il leader del mercato: PROFIBUS (PROcess FIEld BUS)

- ❑ **Profibus FMS (Fieldbus Message Specification), 1991**
 - Implementato nei livelli ISO-OSI 1,2,7
 - Comunicazione tra i processi a livello di cella, multi-master (token-passing)
 - Versatile (grande varietà di applicazioni)

- ❑ **Profibus DP (Device Peripheral), 1994**
 - Implementato nei livelli ISO-OSI 1,2 (linee guida “users” invece del livello 7)
 - Comunicazione tra i processi a livello di campo (sensori, attuatori,..)
 - Più veloce, efficiente (meno master, meno dati per pacchetto) ed economico
 - Plug and play

- ❑ **Profibus PA (Process Automation), 1995**
 - Implementato nei livelli ISO-OSI 1,2 (linee guida “users” invece del livello 7)
 - Tecnologia trasmissiva IEC 1158-2 invece di RS485 o fibra ottica
 - Alimentazione fornita dal bus (sicurezza intrinseca)

- ❑ **Profinet 2001**
 - Integrazione tra Profibus e le tecnologie Ethernet e IT (Information Tech)

NOTA: www.profibus.com

PROFIBUS (*)

❑ **Organizzazioni**

- **Profibus Trade Organization (PTO)**
- **Profibus User Organization (PNO)**
- **Profibus International (PI)**
- **Profibus Network Italia (PNI) con Centro di Competenza a Brescia**

❑ **Normative**

- **standard tedesco secondo la normativa DIN 19245 (1991)**
- **standard europeo secondo la normativa EN 50170 (1996)**
- **standard internazionale IEC (International Electrotechnical Commission)**
 - **IEC 61158 (bus di campo per uso industriale) tipo 3 (Profinet tipo 10)**
 - **IEC 61178 (profili sopra il livello 7 ISO/OSI)**
 - **CPF (Communication Profile Family) 3/1 per Profibus-DP**
 - **CPF (Communication Profile Family) 3/2 per Profibus-PA**
 - **CPF (Communication Profile Family) 3/3 per Profinet**

PROFIBUS E LIVELLI ISO/OSI (*)

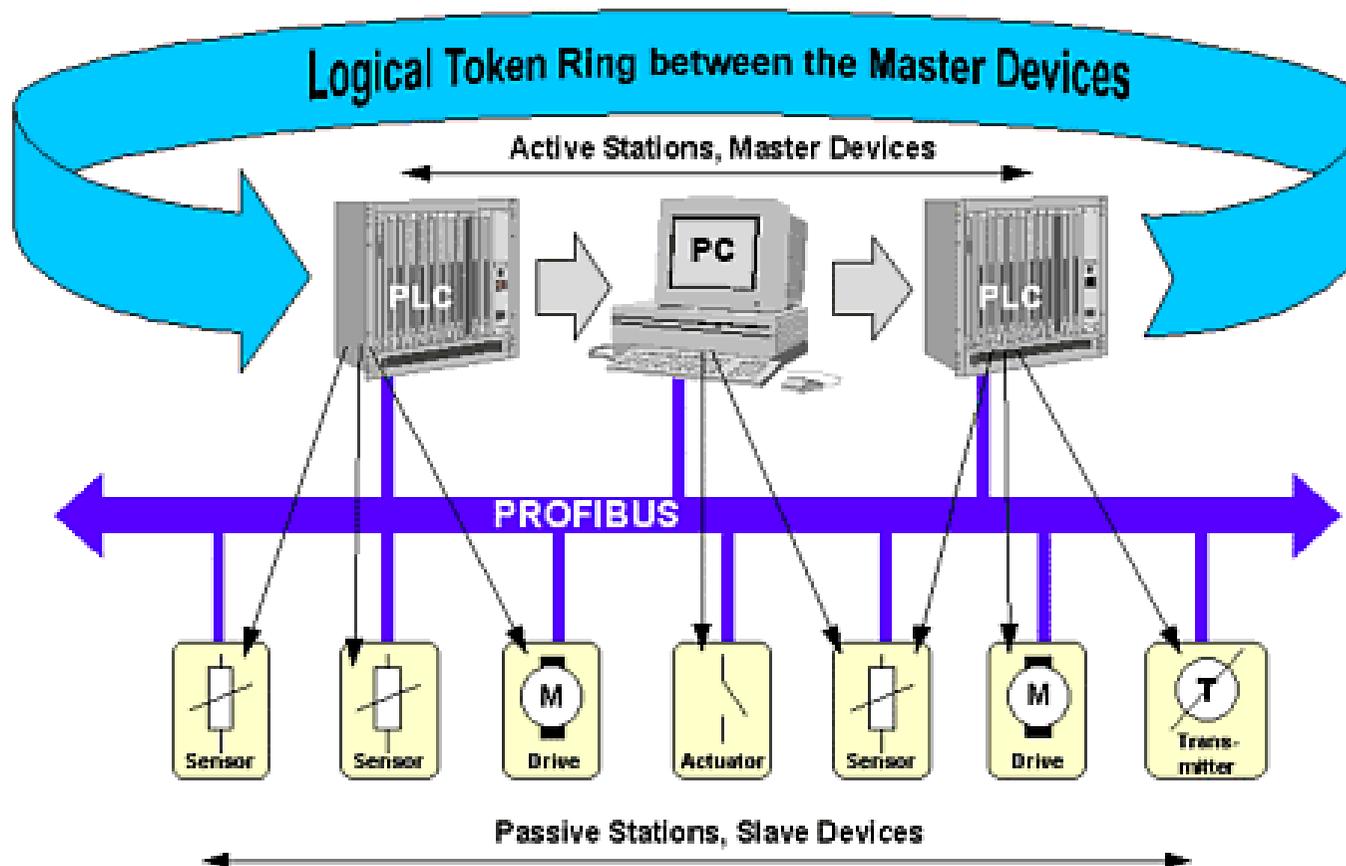
□ Profibus-DP, PA: implementazione ai livelli 1,2 e utente

| ISO/OSI | FMS | DP | PA |
|---------|---|--|--|
| User | Profili FMS | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Profili DP</div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Profili PA</div> |
| | | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">DP –parte aciclica-</div> | |
| | | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">DP –parte ciclica-</div> | |
| 7 | FMS | - | |
| 3-6 | - | | |
| 2 | Fieldbus Data Link (FDL) | | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">IEC interface</div> |
| 1 | RS-485 Fibra ottica (plastica, vetro, PCF -Photonic Crystal Fiber-) | IEC61158-2 MPB (Manchester Encoded Powered Bus) | |

□ Profibus-DP: fisico (PHY), dati (FDL) e Direct Data Link Mapper (DDLMM) verso il livello utente e i profili

PROFIBUS-DP: architettura master-slave

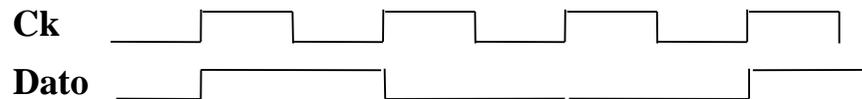
- DPM1 (master di tipo 1): gestione degli slave a gruppi disgiunti
- DPM2 (master di tipo 2): funzioni di diagnostica e programmazione
- Slave (stazioni passive): accedono al bus solo se richiesto dal master



PROFIBUS: GENERALITA'

- ❑ **Accesso al bus di tipo deterministico**
 - **Ciascuno degli N master è autorizzato alla trasmissione per un tempo prestabilito T**
 - **L'autorizzazione a trasmettere (token) viene allocata secondo una sequenza prestabilita (Tip. sequenza circolare –round robin-)**
 - **Massimo tempo di attesa di un messaggio $\approx N \cdot T$ (determinismo)**
 - **Manca una logica di priorità per favorire i messaggi urgenti**
 - **Elevata affidabilità purchè si sorvegli il token**

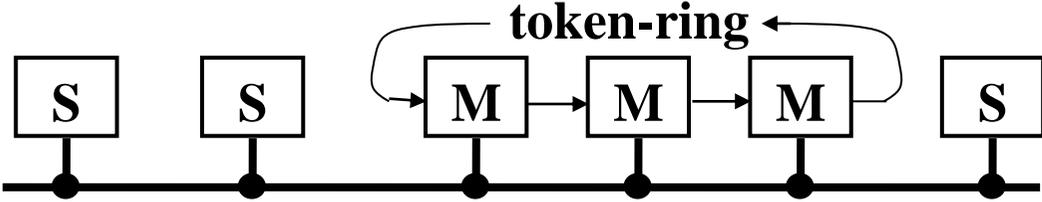
- ❑ **RS485 o fibra ottica (127 utenti, 100m, 9.6kbaud-12Mbaud)**
 - **Trasmissione asincrona (Start-bit, D7-D0, Parity-bit, Stop-bit) Efficienza=8/11**
 - **Codifica dei segnali NRZ (Non Return to Zero)**



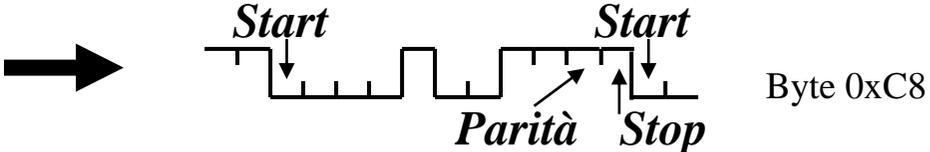
- ❑ **Definito solo ai livelli 1,2,7**
 - **Livello applicazione: definizione di “profili” per la standardizzazione dei dati**

PROFIBUS

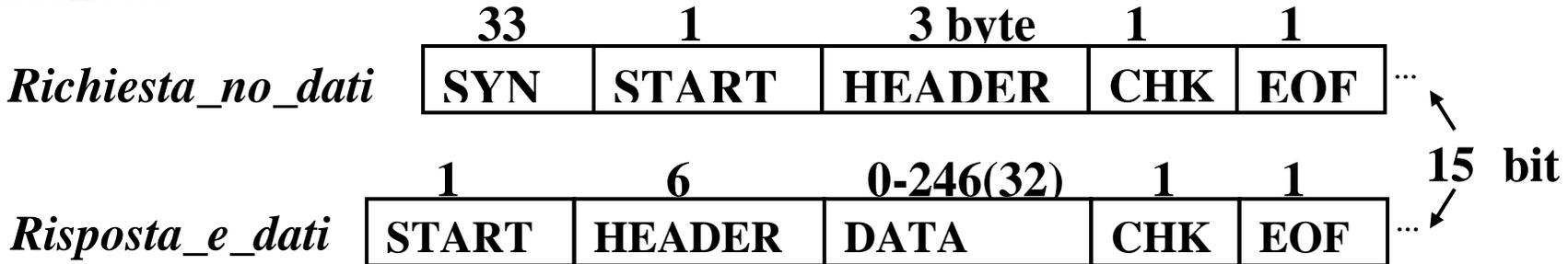
➤ **MASTER-SLAVE**
(Gli Slave parlano solo se interrogati)



➤ **Trasmissione asincrona con parità**
(riduzione del data-rate di 8/11)



➤ **Pacchetto**



➤ **Informazione: 2 byte** **Tipo rete: PROFIBUS-DP @ 12Mbit/s**

$$T_{PRF} = T_{req} + T_{resp} + T_{if} = ((6 + 9 + 2) \times 11 + 48) \times T_{bit} = 20 \mu s$$

$$\eta_{PRF} = \frac{2 \times 8 \times T_{bit}}{((6 + 9 + 2) \times 11 + 48) \times T_{bit}} \approx 9.4\%$$

$$Data - rate = \frac{1}{T_{PRF}} = 50 \text{ kword} / s$$

PROFIBUS-DP, PHY: tecnologie trasmissive (*)

□ RS485

- **Standard EIA (Electronic Industries Association), 1983**
- **Fino a 32 ricetrasmittitori 3-state**
- **Trasmissione differenziale bilanciata ± 5 V**
- **uscita protetta rispetto all'abilitazione accidentale di due trasmettitori**
- **Frequenza massima di trasmissione $100\text{kHz} < f_{\text{max}} < 10\text{MHz}$ dipendente dalla lunghezza del cavo (max. 4000m)**

□ Fibra ottica

- **Cavo economico di accoppiamento in fibra ottica di plastica per interno in applicazioni di ridotte estensioni (distanze inferiori ai 50 m).**
- **Cavo LWL (dal tedesco Lichtwellenleiter “conduttore di onde luminose”) in fibra in vetro per interno ed esterno con distanze inferiori al chilometro.**
- **Connettori speciali che integrano convertitori da fibra ottica a RS485 e viceversa**

PROFIBUS (PHY): RS485, cavi (*)

□ Due tipologie di cavo (cavo B in disuso)

| PARAMETRI | Cavo tipo A | Cavo tipo B |
|--------------------------------|--|--|
| Impedenza caratteristica Z_w | da 135 a 165 Ω $f \in [3 \text{ MHz}, 20 \text{ MHz}]$ | Da 100 a 130 Ω $f > 100 \text{ MHz}$ |
| Capacità C' | < 30 pf/m | < 60 pf/m |
| Resistenza R' | 110 Ω/km | - |
| Diametro | > 0,64 mm | > 0,53 mm |
| Area sezione | > 0,34 mm ² | > 0,22 mm ² |

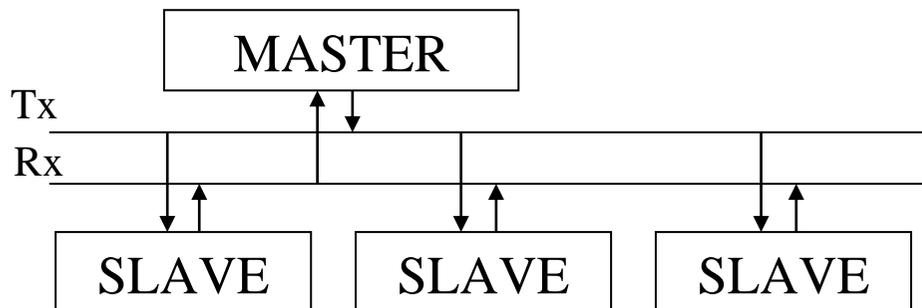
□ La massima distanza dipende dalla frequenza

| Baud rate (kbit/s) | 9,6 | 19,2 | 93,75 | 187,5 | 500 | 1500 | 12000 |
|------------------------|------|------|-------|-------|-----|------|-------|
| Lungh. Cavo tipo A (m) | 1200 | 1200 | 1200 | 1000 | 400 | 200 | 100 |
| Lungh. Cavo tipo B (m) | 1200 | 1200 | 1200 | 600 | 200 | 70 | - |

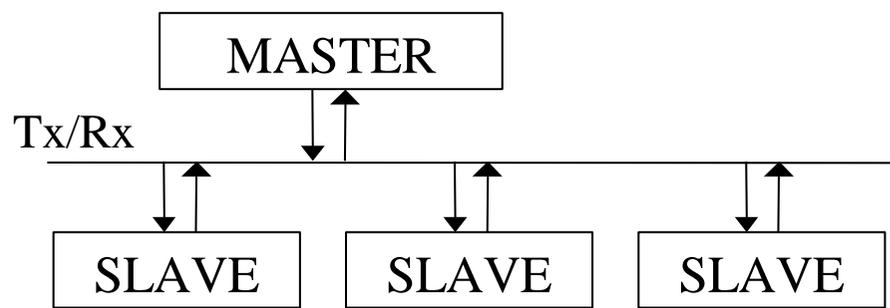
- tempo di salita $tr < 0.3T = 0.3/f_{max}$
- $tr \approx R' * C' * L^2 \approx 3ps * L^2[m]$ $f_{max}[MHz] < 0.3/10^6 tr \approx 10^5/L^2[m]$
 Es. $L=100m \rightarrow f_{max} < 10MHz$, $L=1000m \rightarrow f_{max} < 100kHz$

PROFIBUS (PHY): RS485, connettore (*)

- ❑ **Modalità di connessione half duplex (connettore uguale per master o slave)**

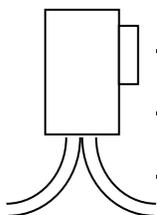


Full-duplex



Half-duplex

- ❑ **Connettore del cavo Sub d 9 poli maschio (femmina sul device)**



- **Linea a $\pm 24V$ (min. 100mA)**
- **Schermo a massa del device**
- **“1” -> +5V (3) e DGND (8)**
- **“0” -> DGND (3) e +5V (8)**
- **Connettore con 2 cavi**
- **Derivazioni (stub) da evitare**
- **Ripetitori (->126 nodi)**
- **Capacità nodo 15-25pF**

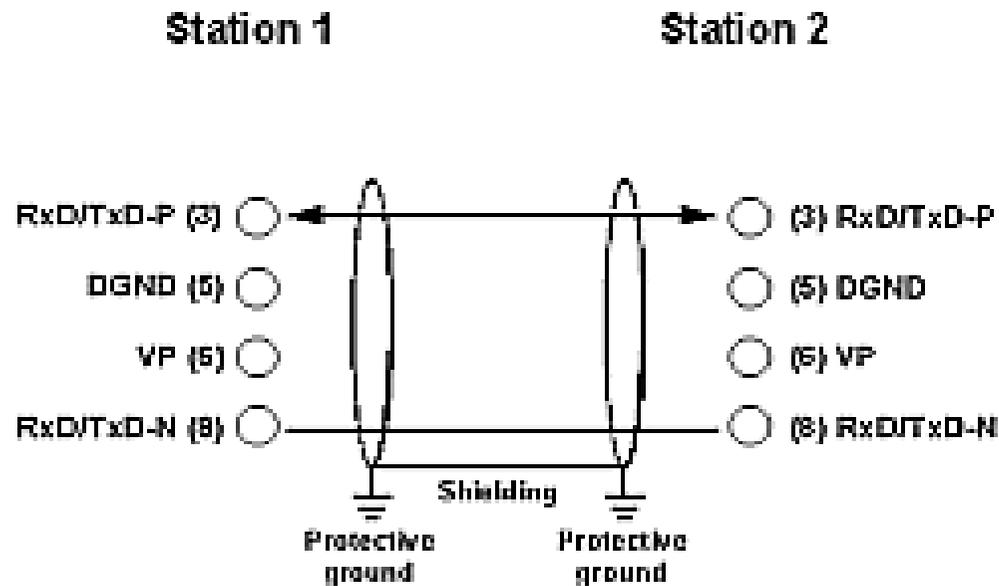
| N° pin | Nome segnale | Significato |
|--------|--------------|---------------------------------|
| 1* | SHIELD | Protezione EMC |
| 2* | M24V | Tensione di uscita - 24V |
| 3 | RxD/TxD-P | Ricezione/trasmissione dati (B) |
| 4* | CNTR-P | Controllo per ripetitori |
| 5 | DGND | Massa di Vp |
| 6** | VP | Tensione positiva +5V |
| 7* | P24V | Tensione di uscita + 24V |
| 8 | RxD/TxD-N | Ricezione/trasmissione dati (A) |
| 9* | CNTR-N | Controllo per ripetitori |

*) segnali opzionali **) segnale necessario solo per le stazioni di fine bus

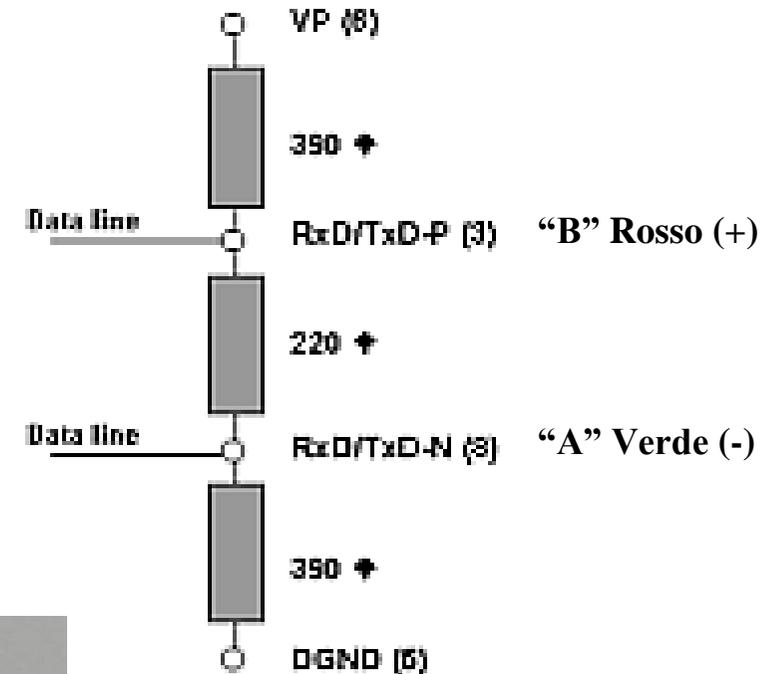
PROFIBUS (PHY): RS485, terminazioni (*)

Terminazioni

- Si attivano ai capi della linea per limitare l'effetto delle riflessioni
- Per frequenze elevate è opportuno disaccoppiare il ricetrasmettitore mediante induttanze ($L=110\text{nH}$) in serie



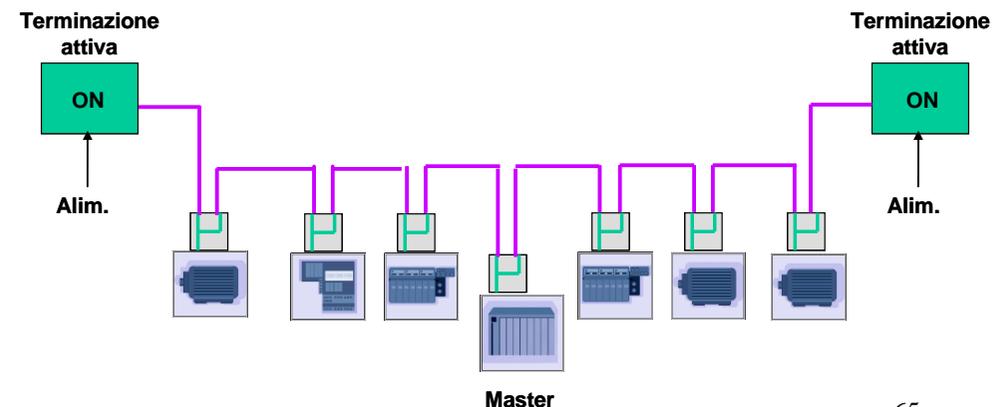
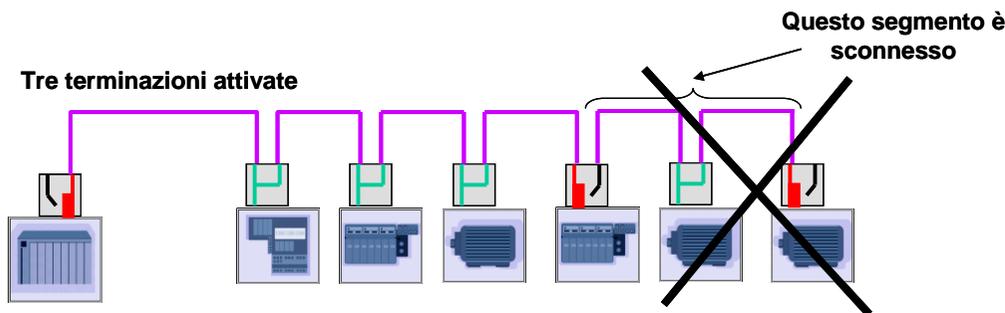
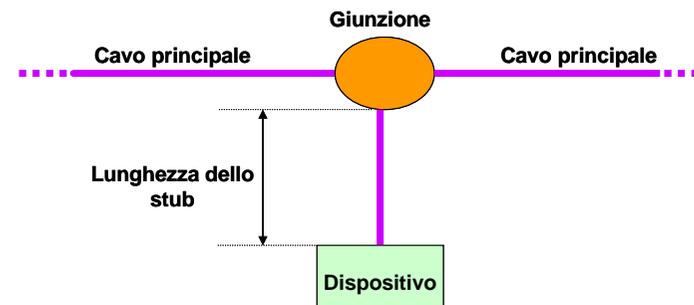
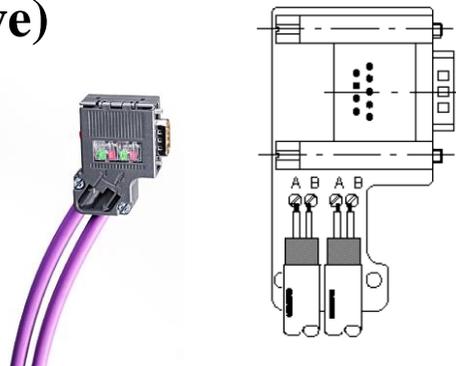
Cabling



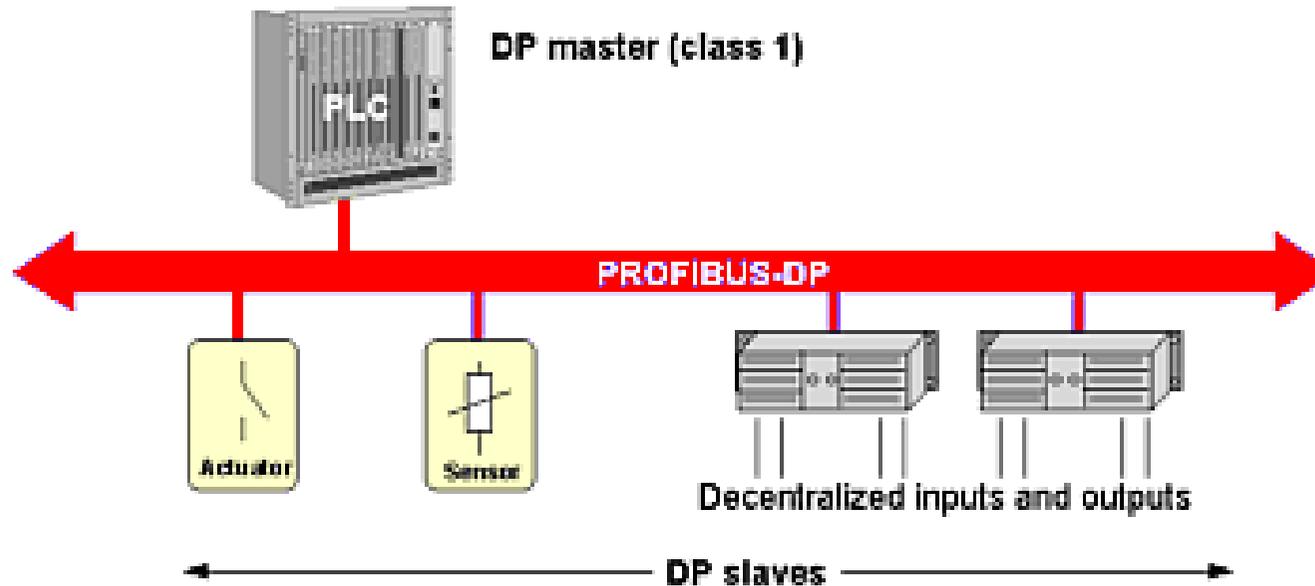
Bus termination

PROFIBUS (PHY): connettori e terminazioni attive (*)

- ❑ **Problematiche di cablaggio (molto rilevanti a elevate frequenze di trasmissione)**
 - Tenere gli “stub” corti (sconsigliati) e i cavi lunghi (>1m)
 - Connettori con terminazioni per topologie lineari
 - I dispositivi (e le terminazioni) devono essere alimentati
 - Attivare terminazioni intermedie o disalimentare nodi può creare problemi (terminazioni attive)

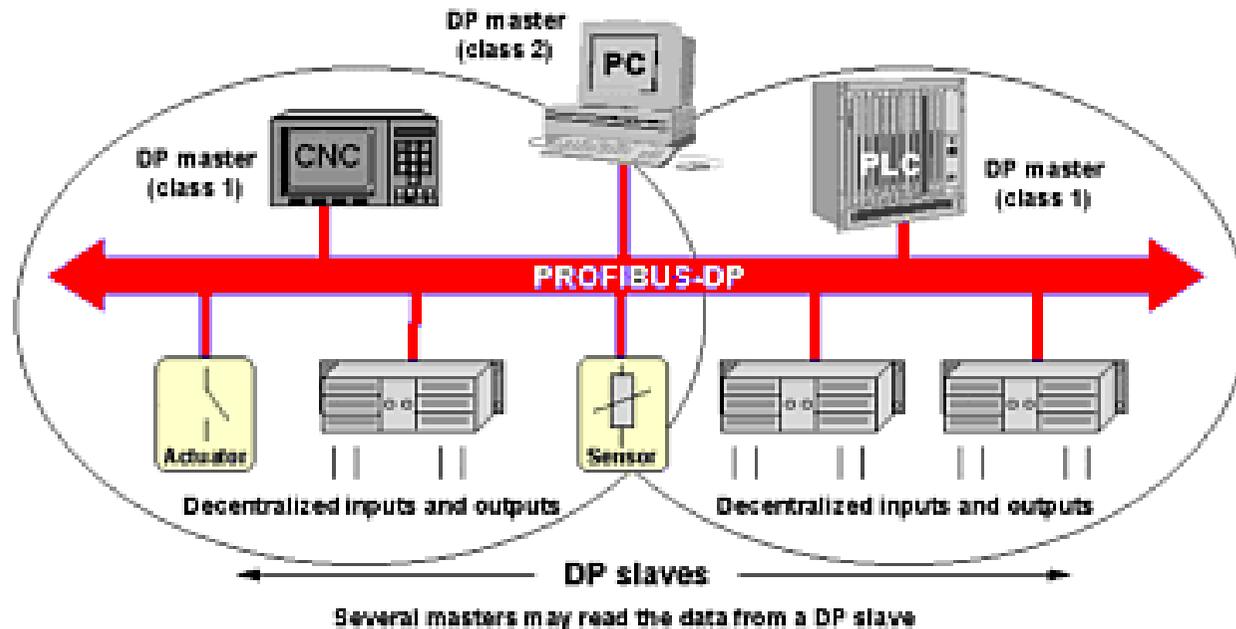


PROFIBUS-DP: applicazioni mono-master (le più diffuse)



- 1 master e fino a 124 slaves (indirizzamento da dip switch o SW)
 - Indirizzi speciali: 127 (broadcast), 126 (default), 0 (diagnostica), 1 (DPM1)
- Massime prestazioni a 12Mbaud ($T_{bit}=83ns$, $T_{byte}=11T_{bit}=0.917\mu s \sim 1\mu s$)
 - Gli slave vengono scanditi ciclicamente
 - Ogni slave occupa un tempo T_{mc} pari alla somma del messaggio di richiesta e out data e del messaggio di risposta (in data). $T_{mc} \sim 28\mu s + T_{dataI/O}$
 - $T_{ciclo} \sim N_{slave}(28\mu s + T_{dataI/O})$ Es. $N_{slave}=32$, $T_{dataI/O}=4byte$, $T_{ciclo} \sim 1ms$

PROFIBUS-DP: multimaster



□ Token passing

(ciascun master gestisce le proprie comunicazioni per metà del tempo di token)

- Ogni slave può essere letto da ogni master, ma appartiene ad un solo DPM1
- Lista dinamica dei master attivi (This, Next, Previous)
- Plug&play: ogni nodo attivo deve rilevare eventuali nodi tra TS e NS

□ Stati di un DPM1:

Stop (non comunica con gli slave), Clear (out slave in sicurezza), Operate (scambia dati con gli slave)

PROFIBUS-DP: FDL, servizi di trasmissione (*)

□ 2 tipi di servizi di trasmissione

- **SDN (Invio di dati senza conferma, utilizzato per la comunicazione broadcast o multicast)**
 - **SYNC/UNSYNC (i dati relativi alle uscite vengono effettivamente scritti nelle uscite solo all'istante del prossimo comando di sync)**
 - **FREEZE/UNFREEZE (gli ingressi non vengono più aggiornati fino al prossimo comando di freeze)**
- **SRD (Invio e richiesta dati con conferma, con scambio bidirezionale di dati in un solo ciclo di telegramma)**
 - **il master invia i dati in uscita allo slave e riceve in risposta entro un tempo specificato o i dati in ingresso un telegramma di conferma breve ("E5")**
 - **i dati sono visti dal master e dallo slave come immagini di processo**

□ Frame o messaggio o telegramma

Sequenza di bytes adiacenti preceduti da un periodo di inattività (33Tbit=SYN)

PROFIBUS-DP: Tempi di ciclo (*)

- Verifica temporizzazioni (esempio: slave con 4+2 bytes di input/out, 12Mbaud)

Da master a slave: $T_{syn} + T(\text{frame di richiesta lunghezza variabile -9 byte- e dati})$

Da slave a master: $T_{sdr} + T(\text{frame risposta lunghezza variabile -9 byte- e dati}) +$
 $+ T_{id1}(\text{tempo prima di poter trasmettere un altro telegramma})$

$T_{syn}=33\text{bit}$ $T_{sdr}=\text{risposta slave (11..800Tbit -> 30Tbit)}$ $T_{id}=75\text{Tbit}$

$T_{mc} = \text{tempo slave} = 33+9*11+D_{out}*11+30+9*11+D_{in}*11+75 = 336\text{Tbit}+11(D_{in}+D_{out})$
 $= 28\mu\text{s} + (D_{in}+D_{out})*0.917\mu\text{s} \sim 28\mu\text{s} + (D_{in}+D_{out})*1\mu\text{s}$

$T_{ciclo} = \text{somma dei } T_{mc} \text{ di tutti gli } N_s \text{ slave} = N_s*28\mu\text{s} + \Sigma(D_{in}+D_{out})*1\mu\text{s}$

Normalmente si hanno tempi di ciclo nell'ordine del ms

PROFIBUS-DP: DDLM (*)

❑ Direct Data Link Mapper

- **Gestione degli scambi dati mediante i punti di accesso ai servizi (SAP)**

- **Default, SSAP/DSAP assenti (Data_exchange)**
- **SAP54 comunicazione master-master (Get_master_diag)**
- **SAP55 cambio indirizzo nodo (Set_Slave_Address)**
- **SAP56 Lettura ingressi (Read_Inputs)**
- **SAP57 Lettura uscite (Read_Outputs)**
- **SAP58 Comandi di controllo a uno slave DP (Global_Control)**
- **SAP59 Lettura configurazione (Get_Cfg)**
- **SAP60 Lettura dati diagnostici (Slave_diagnosis)**
- **SAP61 Trasmissione parametri (Set_Prm)**
- **SAP62 Verifica parametri (Chk_Prm)**
-

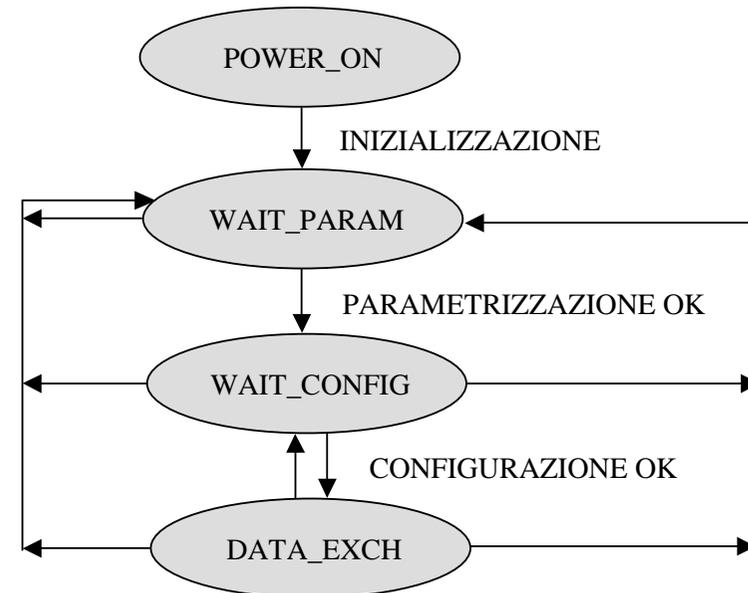
❑ **Ad esempio, per cambiare l'indirizzo di uno slave, un DPM2 usa DSAP=SAP55 (SSAP=SAP62) con campo dati che contiene il nuovo indirizzo e l'identificatore (16 bit rilasciati dal consorzio Profibus)**

❑ **Diagnosi a livello di device, module, channel**

PROFIBUS-DP: slave

❑ Macchina a stati

- **Inizializzazione**
 - **Indirizzazione** (Set_slave_address)
- **Parametrizzazione** (Set_prm,Get_Cfg,Slave_diag)
 - **Identificazione**
 - **Supporto delle funzionalità**
- **Configurazione** (Chk_Cfg,Slave_diag)
 - **Numero di byte di I/O**
- **Scambio dati** (Read_inputs, Read_outputs)
 - **Controllo Watchdog**



❑ Alla partenza il master:

- **Interroga lo slave** (DDLMSlave_diag) per vederne lo stato (c'è, è gestito da DPM2,..)
- **Lo parametrizza** (DDLMSet_Prm)
- **Ne verifica i dati di configurazione** (DDLMSlk_Cfg)
- **Quindi se va tutto bene passa alla fase di scambio dati** (DDLMSData_Exchange) altrimenti ricomincia

PROFIBUS-DP: plug&play grazie al file GSD

- ❑ **File GSD = data sheet elettronico (device description file)**
 - **File ASCII che contiene le informazioni dello slave o del DPM1 (Es. Baud rate supportati, servizi supportati, lunghezza dei dati, caratteristiche dinamiche – Tsdr = tempo max, dopo il quale lo slave deve rispondere-,...).**
 - **Informazioni necessarie e informazioni opzionali**
 - **Viene caricato nel DPM2 e permette la completa gestione del device**

#Profibus_DP

Vendor_Name = "UNIBS"

Ident_Number = 0x05AD

Station_Type = 0 (0=slave, 1=master)

9.6_supp = 1

45.45_supp = 1

1.5M_supp = 1 (non supporta 12Mbaud)

MaxTsdr_19.2 = 60

Freeze_Mode_Supp = 1

Fail_Safe = 1

GSD_Revision = 1

Model_Name = "PROVA"

Protocol_Ident = 0 (non supporta FMS)

Hardware_Release = "V3.2"

19.2_supp = 1

500_supp = 1

MaxTsdr_9.6 = 60

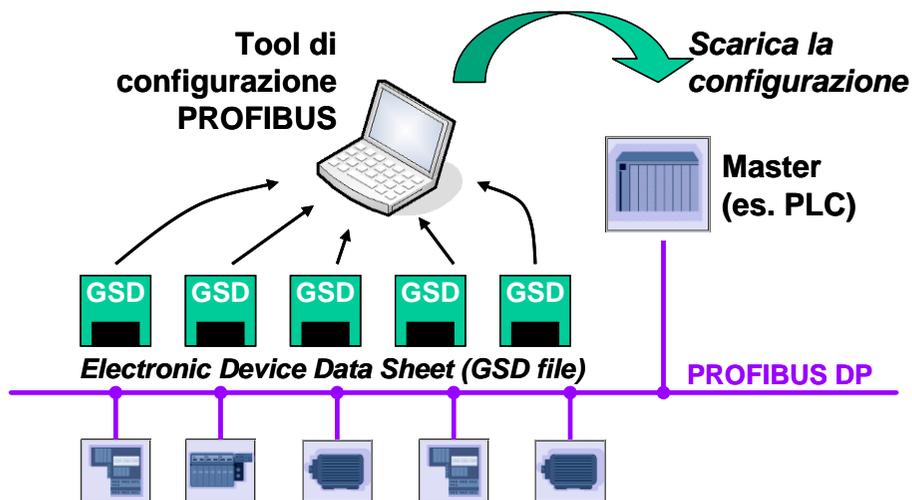
MaxTsdr_1.5M = 150

Sync_Mode_Supp = 1...

Implementation_Type= "SPC3"

PROFIBUS-DP: configurazione

- ❑ Ogni produttore descrive il suo nodo attraverso il file GSD
 - Tutti i GSD sono caricati per generare la configurazione di sistema (così come quando configuro il PLC devo dire quali moduli di I/O sono connessi alla CPU)
 - vedi www.profibus.com/meta/productguide



Configurazione HW - [SIMATIC 300(1) (Configurazione) -- SPC3_ARC_ENC_GEF]

Stazione Modifica Inserisci Sistema di destinazione Visualizza Strumenti Finestra ?

UR

1 CPU 315-2 DP

2 DP

3 CP 343-1 PN

4 5 6 7

PROFIBUS(1): Sistema master DP (1)

(2) ENCOD

(4) IM151-1

(3) IM151-1

Profilo: Standard

4DI DC24V ST

4DI DC24V/SRC ST

DO

2DO AC24...230V/1A

2DO DC24V/0.5A HF

2DO DC24V/0.5A ST

2DO DC24V/2A HF

2DO DC24V/2A ST

2RO NO DC24...120V/5

2RO NO/NC DC24...12

4DO DC24V/0.5A ST

4DO DC24V/2A ST

FM

IQ-SENSE

Moduli partenza motore

PM

PM-E DC24...48V/AC1

PM-E DC24...48V/AC1

PM-E DC24V

PM-E DC24V/AC120V

IM151-1 FO Standard

IM151-1 FO Standard

IM151-1 FO Standard

IM151-1 High Feature

IM151-1 Standard

IM151-1 Standard

IM151-1 Standard

IM151-1 CPU

IM151-7 CPU

IM151-7 CPU

IM151-7 CPU FO

IM151-7 CPU

6ES7 138-4CA00-0AA0

Modulo power PM-E per moduli di elettronica, DC24V, con diagnostica

| Posto connettore | Unità | Numero di ordinazione | Indirizzo E | Indirizzo A | Commento |
|------------------|-------------------|-----------------------|-------------|-------------|----------|
| 1 | PM-E DC24V | 6ES7 138-4CA00-0AA0 | | | |
| 2 | 2DI DC24V ST | 6ES7 131-4BB00-0AA0 | 0.0...0.1 | | |
| 3 | 4DO DC24V/0.5A ST | 6ES7 132-4BD00-0AA0 | | 0.0...0.3 | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |

Inserzione possibile

Start SIMATIC Manager - SPC3... Configurazione HW - [...

Modifica 15.08

PROFIBUS-DP: profili

- **Profilo = definizione delle caratteristiche e delle proprietà di un'applicazione**
 - **Profili generali (General application profiles)**
 - **Es. PROFIsafe (come i dispositivi di emergenza comunicano su Profibus)**
 - Numerazione progressiva dei telegrammi
 - Timeout sugli acknowledge
 - Identificatori tra trasmettitore e ricevitore (password)
 - **Profili specifici (Specific application profiles)**
 - **Es. PROFIdrive (comportamento e accesso agli azionamenti. 6 classi)**
 - **Molte tipologie supportate (Fluid Power, Robots/NC, Panel devices, Encoders, Remote I/O, PA devices,...)**
 - **Profili di master e sistemi (System and master profiles)**
 - **Master profile (comunicazione ciclica, aciclica, isocronia, diagnosi, sincronizzazione, sicurezza)**
 - **System profile (include i profili dei master, ma anche le interfacce verso la programmazione –standardized Function Blocks IEC61131-3-, e le strategie di integrazione –GSD file, EDD, DTM)**

EDD = Electronic Device Description (~IEEE1451.2TEDS)

DTM=Device Type Manager (~driver)

LA SICUREZZA INTRINSECA

- ❑ **Safety e Security**
- ❑ **Le apparecchiature elettriche devono essere progettate in modo da non generare archi o scintille che possano innescare esplosioni, sia durante il normale funzionamento, sia in caso di guasto**
- ❑ **La sicurezza intrinseca si applica alle aree a rischio di esplosione, ossia in presenza di sostanze potenzialmente pericolose (Es. miscele di gas)**
- ❑ **Ossidazione, combustione ed esplosione sono reazioni esotermiche a diversa velocità di reazione. Esplosione \longleftrightarrow presenza contemporanea di:**
 - **Combustibile (gas, vapori o polveri)**
 - **Comburente (aria e ossigeno)**
 - **Energia di accensione elettrica o termica**
- ❑ **Le protezioni tendono ad eliminare una o più delle tre componenti**
- ❑ **Rischio accettabile: l'esplosione si innesca solo a causa di 2 eventi indipendenti a bassa probabilità**

PROFIBUS-PA

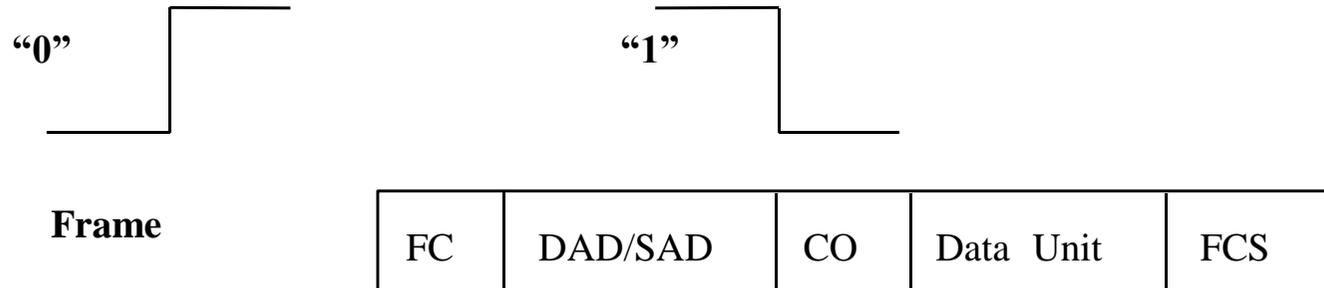
- ❑ Implementato nei livelli 1,2,Users (invece di 7)
 - 10 utenti, 1900m, 31.25kbaud, trasmissione sincrona (invece che asincrona)
 - utilizza la tecnologia trasmissiva IEC1158-2 a sicurezza intrinseca
 - alimentazione dal bus, possibilità di sostituzione dei componenti on-line
 - profili dedicati

| | |
|-----------------------------------|--|
| Trasmissione dati | Digitale, codifica di Manchester, bit sincro |
| Velocità di trasmissione | 31,25 Kbit/s |
| Sicurezza dati | Preambolo, delimitatore finale, verifica di errore iniziale |
| Mezzo fisico | Coppia di conduttori attorcigliati (se necessario) schermati |
| Alimentazione remota | Opzionalmente attraverso la linea dati |
| Protezione alle esplosioni | Possibili operazioni in condizioni di sicurezza intrinseca e non |
| Topologia | Lineare, ad albero o miste |
| Numero stazioni | 32 stazioni per segmento, max 126 con ripetitori |
| Ripetitori | Massimo 4 ripetitori |

PROFIBUS-PA: FRAME (*)

❑ Codifica dei segnali Manchester (Invece che NRZ)

- Frame preceduto da un preambolo di sincronizzazione



FC Frame Control (Es. lunghezza pacchetto –1 o 4 byte-)

DAD/SAD Destination o Source Address (2 byte)

CO Control Field (tipo di frame –1byte-)

FCS Frame Check Sequence (2 byte)

• 5 tipi di frame

- frame di lunghezza fissa senza dati (6 bytes)
- frame di lunghezza fissa con dati (14 bytes)
- frame di lunghezza variabile con dati (da 10 a 255 byte)
- Token (5 bytes)
- Ricevuta rapida (3 byte)

PROFIBUS-PA: PROFILI (*)

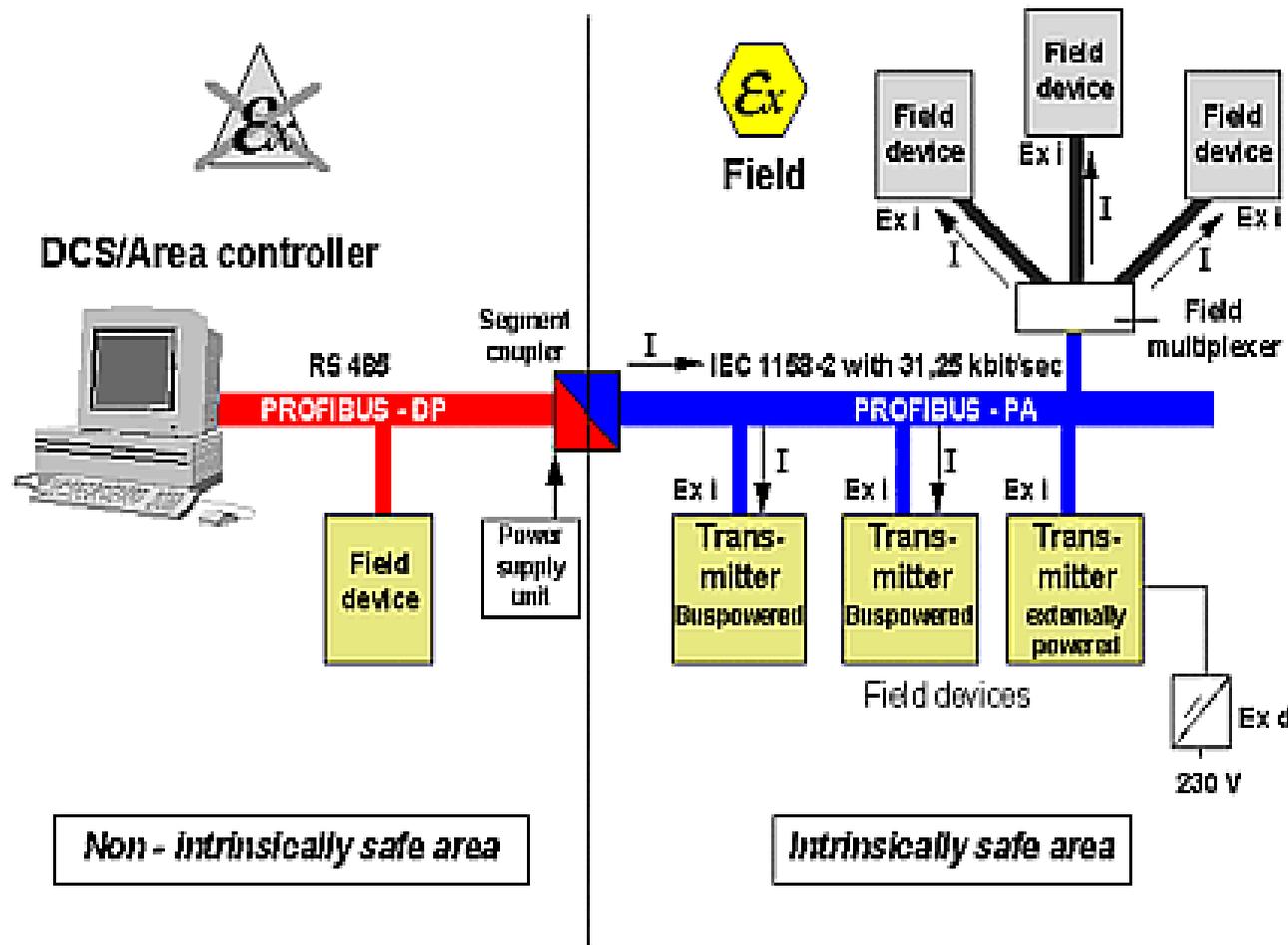
❑ Codifica dei segnali Manchester (Invece che NRZ)

- profili che usano un'interfaccia verso blocchi funzionali
- il comportamento del dispositivo viene descritto mediante delle variabili
- Es. analog input function block (sensore di pressione)

| Parametro | Read | Write | Funzione |
|-----------|------|-------|---|
| OUT | x | | Valore di pressione |
| PV_SCALE | x | x | Unita di scala |
| PV_FTIME | x | x | Tempo di salita (s) |
| ALARM_HYS | x | x | Isteresi delle funzioni di allarme (%FS) |
| HI_HI_LIM | x | x | Soglia superiore di allarme (alarm, status) |
| HI_LIM | x | x | Soglia superiore di warning (warning, status) |
| LO_LIM | x | x | Soglia inferiore di warning (warning, status) |
| LO_LO_LIM | x | x | Soglia inferiore di allarme (alarm, status) |
| ... | ... | ... | ... |

PROFIBUS-DP: interfaccia verso PROFIBUS-PA

- ❑ I due protocolli differiscono per livello fisico, tipo di trasmissione e trame
 - Uso di bridge (nota: PA è molto più lento di DP)

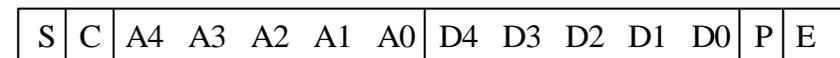


ACTUATOR SENSOR INTERFACE (ASI)

- ❑ Bus di campo dedicato a sensori e attuatori “binari” (versione semplificata di Profibus PA)
- ❑ Architettura mono-master (31 slaves, 4bit/slave, 100m, 167kbaud, doppio)
 - Codifica dei segnali Manchester
 - Serie di interrogazioni cicliche e, alla fine di ogni ciclo, selezione aciclica di uno slave alla volta
 - Codifica dei segnali Manchester

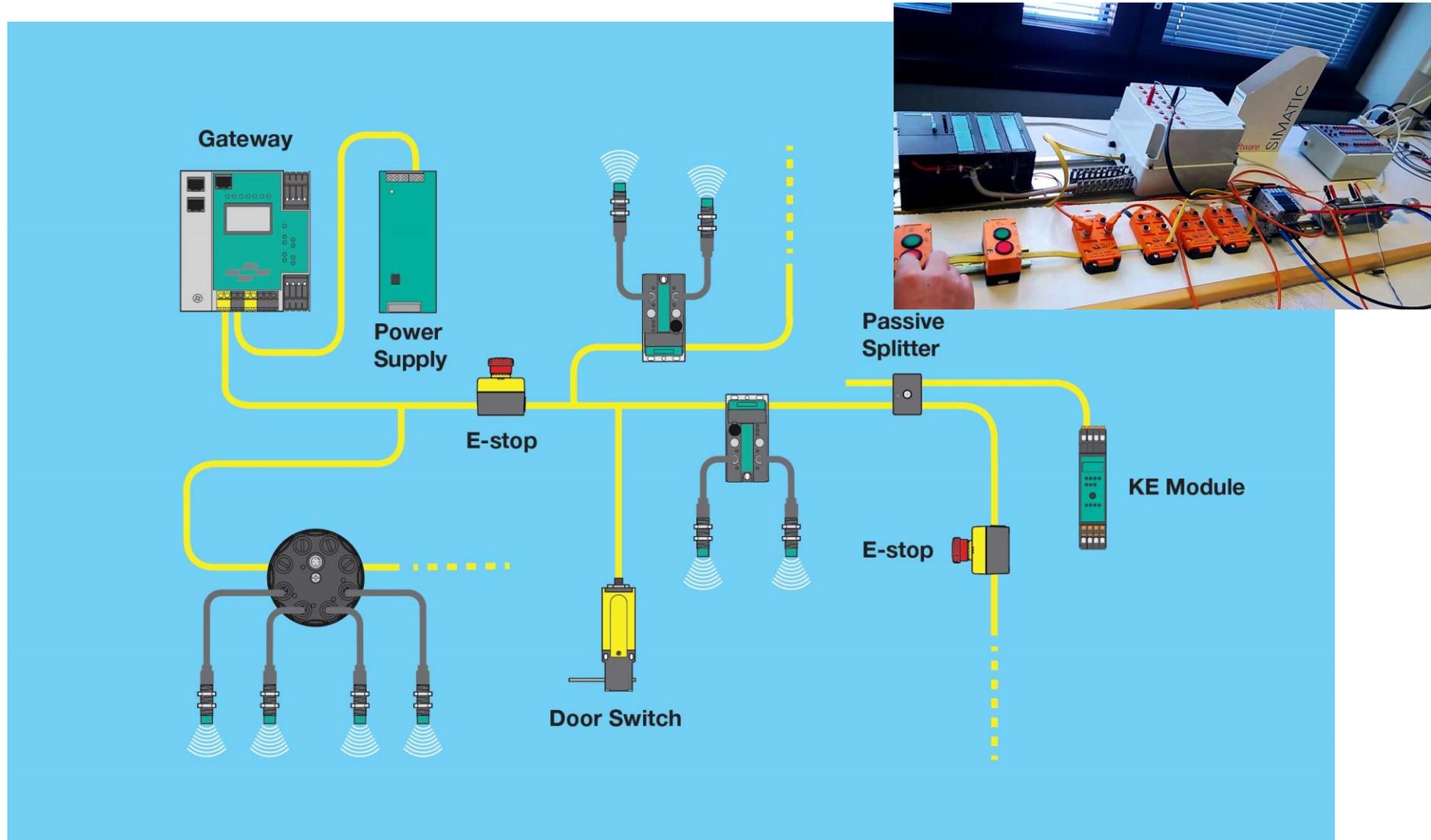


- MD Master Data (richiesta del master -chiamata dati, parametri, indirizzamento, comando) E' composta da 14 bit (Start bit S=0, Control bit C, 5 address bit A_i, 5 data bit D_i, Parity bit P e end bit E=1).
- MP master pause
- SD slave data (Start S, D3-D0, Parity P, End E) -> Efficienza=1/(14+3+8+1)≈3.8%



NOTA: www.as-interface.com

ACTUATOR SENSOR INTERFACE (ASI)

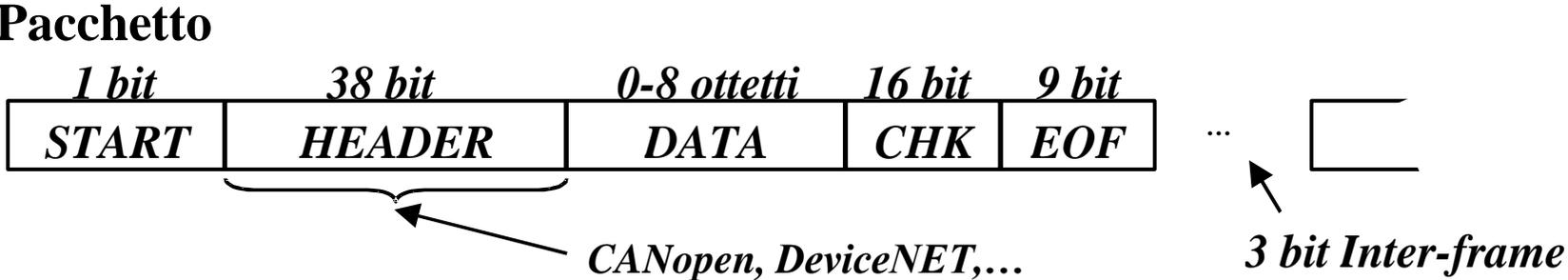
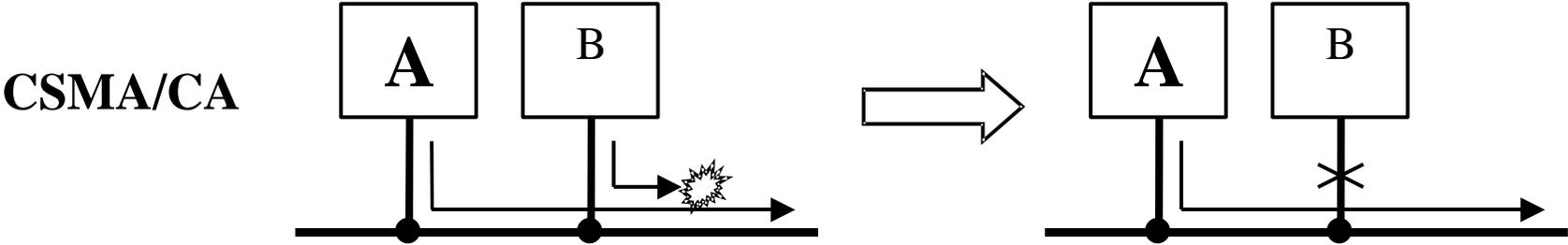


Il più economico: CANbus2.0B (Controller Area Network)

- ❑ **Sviluppato nel '85 dalla Bosh per il settore automobilistico.
(CiA -CAN in Automation- dal 1992)**
 - **NORMATIVE**

| | |
|--------------------|---------------------------------|
| ISO 11519-1 | Generalità e definizioni |
| ISO 11519-2 | CAN fino a 125 Kbit/s |
| ISO 11898 | CAN fino a 1 M bit/s |
 - **Presente in molti microcontrollori (economico, aggiungo solo il trasformatore)**
 - **Bus ad accesso casuale (32 utenti, 50m, 1Mbaud)**
 - **Codifica dei segnali sincrona NRZ con piloti open-collector (vince lo zero)**
 - **CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoiding)**
 - **Livello fisico: doppino con trasmissione differenziale**
 - **Disconnessione automatica del nodo, ritrasmissione automatica in caso di errori**
 - **Supporta 4 tipi di frame:**
 - **Data (scambio dati)**
 - **Remote (richiesta invio dati)**
 - **Error (segnalazione errori)**
 - **Overload (temporanea impossibilità a ricevere)**
 - **Ad alto livello è supportato da CANOPEN (<https://www.can-cia.org/canopen/>) e da altri protocolli non open (es. DEVICENET)**

CANbus2.0B



Informazione: 2 byte

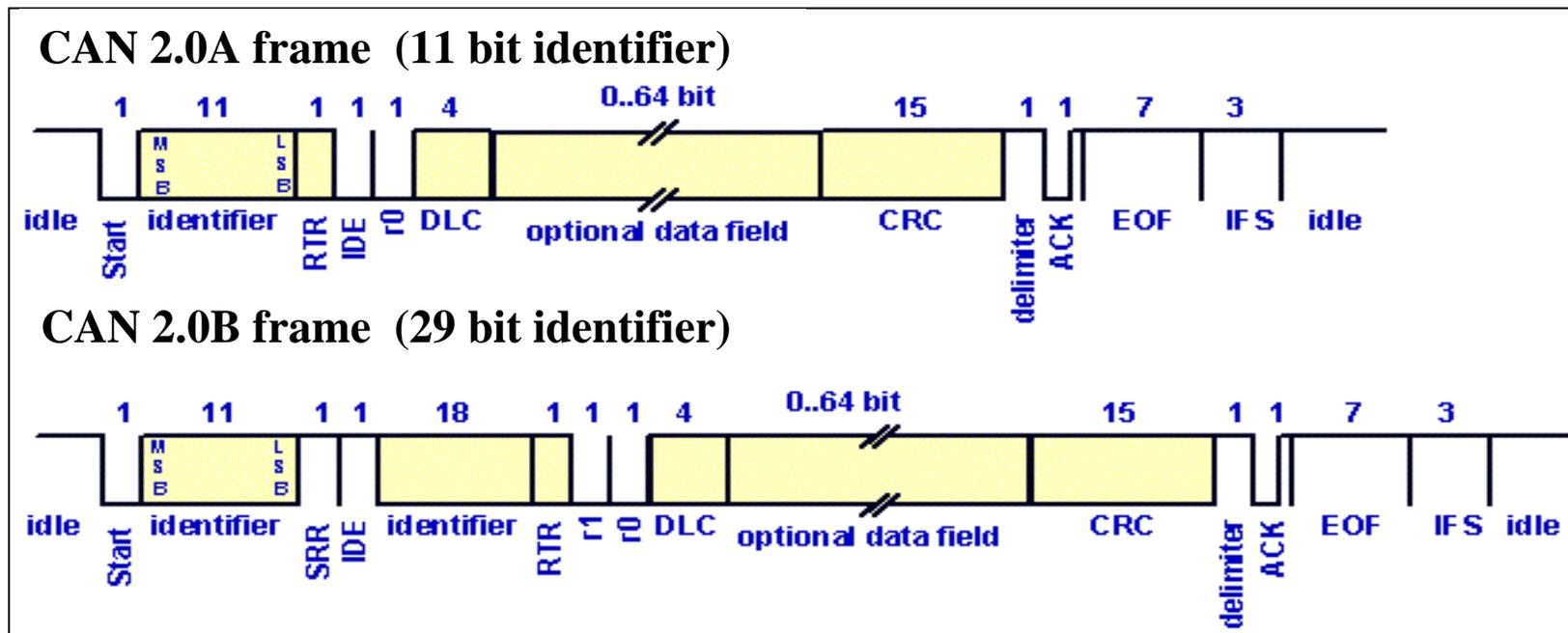
Tipo rete: CAN2.0B @ 1Mbit/s

$$T_{CAN} = (67 + 2 \times 8 + n_{stuf}) \times T_{bit} = 95 \mu s$$

$$\eta_{CAN} = \frac{2 \times 8 \times T_{bit}}{(67 + 2 \times 8 + n_{stuf}) \times T_{bit}} \approx 17\%$$

$$Data - rate = \frac{1}{T_{CAN}} = 10.5 \text{ kword} / s$$

LA TRAMA CAN (*)



- Più economico rispetto a Profibus (supportato da microcontrollori)
- I livelli applicazione (DeviceNet, CANopen, CANKingdom,...) operano a livello identificatore e dati

MODBUS

❑ Utilizzato dai sistemi di supervisione (SCADA)

Livello fisico:

- **Mezzo trasmissivo:**
seriale asincrono, ad esempio RS232, RS485 (half duplex o full duplex);
- **Velocità:** baud rate compresi tra 1200 e 19200;
- **Configurazione:** 8N1; (8 bit di dati, nessun bit di parità, 1 bit di stop);

Livello collegamento dati:

- un unico master sulla rete e fino a 247 slave;
- ogni slave ha un indirizzo univoco compreso tra 1 e 247;
- uno slave risponde solo ed esclusivamente dopo essere stato interrogato dal master;
- minimo overload.

| Slave Address | Function | Data | Check |
|---------------|----------|--------|--------|
| 1 byte | 1 byte | N byte | 2 byte |

NOTA: <http://www.modbus.org/>

MODBUS

□ I livelli superiori

Livello applicazione:

| | |
|--------|----------------------------------|
| 01, 02 | Lettura di n bit |
| 03, 04 | Lettura n word (registri) |
| 05 | Scrittura di un bit |
| 06 | Scrittura di una word (registro) |
| 15 | Scrittura di n bit |
| 16 | Scrittura di n word (registri) |

Livello presentazione: Modbus/TCP (è il primo bus di campo su Ethernet)

- specifica come devono essere formattati i messaggi Modbus quando viaggiano sopra TCP/IP;
- standardizzazione della porta 502.

REAL-TIME ETHERNET (RTE)

- ❑ **Utilizzare Ethernet come bus di campo, il problema delle collisioni e del determinismo:**
 - **Gli switch prevengono le collisioni ma introducono ritardi variabili e imprevedibili**
 - **L'elevata velocità di Ethernet (6-123us per Ethernet 100BaseT) permette di avere comportamento real-time "statistico"**
 - **Il Time Division Multiple Access (TDMA) o le soluzioni master-slave assicurano il determinismo, in assenza di coesistenza con traffico TCP/IP**
 - **La sincronizzazione tra gli switch permette di regolare a priori il traffico**
 - **Switch speciali possono regolare il traffico secondo schemi prestabiliti**
 - **Il pacchetto Ethernet (1500 bytes) permette di ospitare un intero scambio dati ciclico**
 - **Esistono soluzioni software-based (es. Ethernet/IP, Powerlink)**
 - **Naturale evoluzione verso Gbit Ethernet e Wireless Ethernet**
 - **Basati su TDMA, richiedono firewall per il traffico TCP/IP**
 - **Esistono soluzioni hardware-based (es. Profinet, Ethercat)**
 - **Assicurano determinismo e ottime prestazioni**
 - **interfacce o infrastrutture dedicate, 100baseT**

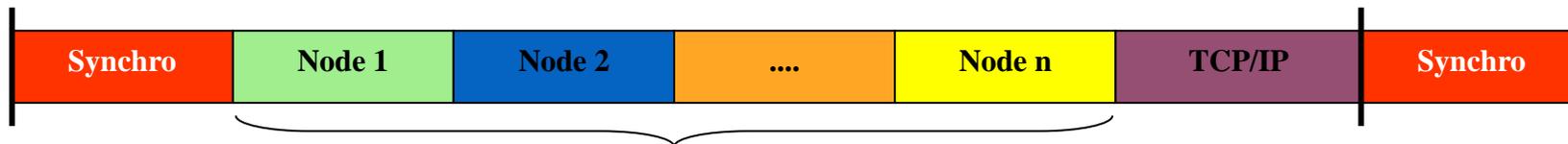
RTE: SOLUZIONI FULL-SOFTWARE

□ TDMA (Time Division Multiple Access)

- Il mezzo fisico (cavo) è riservato interamente a una specifica RTE
- Il traffico TCP/IP (con banda ridottissima) può eventualmente essere gestito da router/gateway speciali

□ Limitazioni e problemi

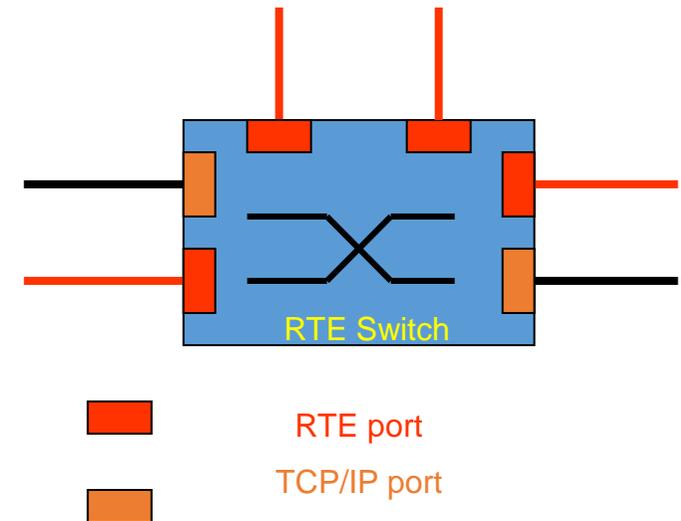
- Difficoltà nell'uso di dispositivi Ethernet "normali" (es. PC...)
- Compensazione dei ritardi dovuti ai cavi e agli switch
- Riduzione della banda reale rispetto all'infrastruttura installata



RTE: SOLUZIONI HARDWARE-BASED

- ❑ **“Enhanced Hardware” rispetto allo standard Ethernet IEEE802.3**
 - TDMA gestito in hardware dentro la scheda di rete
 - Dati modificati “al volo” dentro nei pacchetti ethernet
 - Switch speciali con regole di instradamento aggiuntive
 - Performance ottimizzate, compatibilità con traffico TCP/IP

- ❑ **Limitazioni e problemi**
 - Incompatibilità con altre RTE
 - Hardware proprietario (ASIC) e quindi soggetto a obsolescenza digitale



RTE: PROFINET

❑ Soluzione RTE “mista” SW e HW

- **3 attori: IO-Controller (es. PLC), IO-Device (es. sensori/attuatori), IO-Supervisor (PC per diagnostica e configurazione)**
- **4 classi (Conformance Classes, in accordo a IEC 61784-2):**
 - **CC-A** scambio dati producer-consumer ciclico (SW-like) tra IO-Controller e IO-Devices (10ms di tempo di ciclo, supproto al Wireless)
 - **CC-B** come A con più servizi per la diagnostica e la gestione (es. supporto SNMP e LLDP)
 - **CC-C** Motion Control. Usa un sistema di comunicazione isocrono HW embedded nell’infrastruttura con sincronizzazione e riserva di banda (Profinet IRT)
 - **CC-D** evoluzione di CC-C con Time-Sensitive Networking (sincronizzazione, LAN virtuali, Remote Service Interface,...). Traffico isocrono, traffico ciclico e traffico aciclico. Il traffico isocrono può interrompere la trasmissione di altri frames (Frame Preemption)

| OSI-Layer | Profinet | | | | | |
|-----------|--------------|--|-------|---------|--------|--|
| 7a | Application | Fieldbus Application Layer (FAL) Services and protocols | | | OPC UA | |
| 7b | | | | RPC | | |
| 6 | Presentation | | | -- | -- | |
| 5 | Session | RSI | empty | empty | | |
| 4 | Transport | | | UDP | TCP | |
| 3 | Network | | | IP | | |
| 2 | Data Link | TSN | | CSMA/CD | | |
| 1 | Physical | Ethernet | | | | |

RPC = Remote procedure call