

## **Introduzione all'automazione industriale**

Quando si pensa ad un ambiente industriale, si tende a focalizzare sulle linee di produzione: i componenti e i sistemi implicati sono sensori, attuatori, azionamenti, PLC (Programmable Logic Controller), computer d'automazione, controlli numerici, e via così. Ciascun componente o sistema, preso singolarmente, ha la sua validità e importanza: così ad esempio l'azionamento di un motore a velocità variabile è tanto più accurato quanto più riesce a regolare finemente la velocità e la coppia del motore. Per raggiungere tale obiettivo l'azionamento deve disporre di sensori appropriati per la trasduzione delle variabili da controllare e gestire al meglio le condizioni di alimentazione dei motori. Tuttavia questo può risultare non sufficiente per ottenere una qualità ottimale della lavorazione: si pensi ad esempio all'importanza delle regolazioni a livello superiore, generalmente affidate ad un sistema diverso dall'azionamento, e all'importanza di un'efficiente comunicazione tra questi due sistemi. Tra l'altro si deve sottolineare come le grandezze controllate dall'azionamento siano parte di un più vasto insieme di parametri, detti parametri di processo, la cui conoscenza e memorizzazione nel tempo consente di correlare la qualità del prodotto alla configurazione della linea di produzione. Da un'architettura basata su potenti computer centrali si passa oggi verso un'architettura distribuita, più efficiente ed economica da gestire, che si è resa possibile grazie all'affermarsi di reti di comunicazione e interfacce standard tra i sistemi.

In questo corso si esamineranno brevemente alcuni tra i principali settori manifatturieri interessati all'automazione per poi passare in rassegna, a livello introduttivo e nell'ottica dell'utilizzatore, i principali componenti presenti nel mondo industriale. Particolare attenzione verrà data ai PLC e ai sistemi PC-based principalmente impiegati nella gestione delle informazioni di misura. Il lettore verrà quindi introdotto alle principali problematiche nella progettazione degli impianti, per poi apprendere i concetti fondamentali del CIM, ossia della filosofia che è alla base della fabbrica completamente automatizzata. Per poter raggiungere un buon livello di integrazione tra i vari sistemi di una linea di produzione e tra i vari reparti di una fabbrica è necessario conoscere le reti di comunicazione che, dai diversi settori di un'azienda, collegano i sistemi dai computer fino al più semplice dei sensori. Particolare attenzione verrà quindi data ai bus di campo, tenendo conto delle più recenti evoluzioni del settore verso le tecnologie wireless e di Internet.

## 1. I componenti dell'automazione industriale

In questo capitolo si accenna brevemente ad alcuni tra i principali componenti dell'automazione industriale. Come per il capitolo precedente, si tratta di una breve rassegna fornita per completezza, mentre il resto della trattazione focalizzerà sui sistemi maggiormente interessati all'acquisizione dati e cioè i PLC e i computer industriali e, più in generale, la periferia decentrata, ossia le reti di componenti e sistemi che operano a livello di campo, quali sensori, attuatori e controllori.

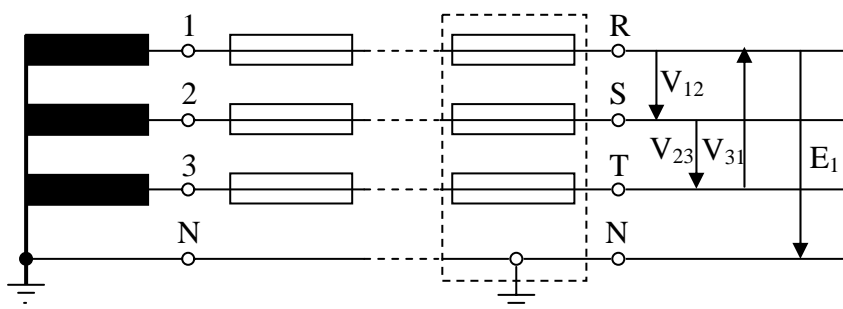
### 1.1 Rete elettrica, motori e azionamenti

In questo capitolo si accenna brevemente ad alcune tra le principali macchine elettriche con riferimento ai motori e ai relativi azionamenti.

Dato che nell'ambiente industriale la distribuzione dell'energia avviene su sistema trifase, questo verrà definito in modo sommario rimandando a testi specifici per ulteriori approfondimenti.

Per la produzione e la distribuzione di energia elettrica si usa solitamente un sistema trifase, formato da 3 tensioni alternate sinusoidali sfasate tra loro di  $120^\circ$ . La frequenza di rete è pari a 50Hz con una tolleranza del 5%. Indipendentemente dalla distorsione armonica delle tre fasi, la loro somma è in ogni istante rigorosamente nulla. Le tre fasi si possono considerare a potenza quasi infinita; infatti la rete di distribuzione dalla centrale è a 380kV, poi viene ridotta di 3 ordini di grandezza e la corrente è in genere limitata dalla portata dei cavi.

Un sistema trifase può essere sommariamente rappresentato come in figura.



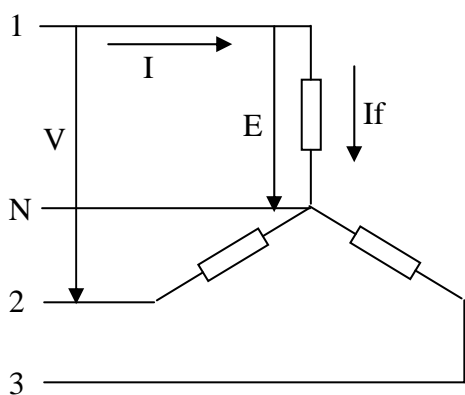
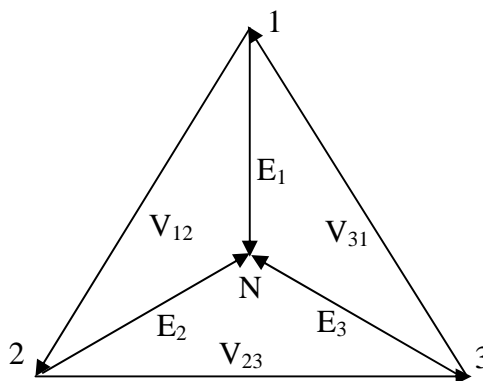
I tre conduttori di linea 1 2 3 (detti anche L1, L2, L3 o R, S, T o U V W se si tratta di morsetti di macchine elettriche) si dicono a stella e il centro stella viene detto neutro o N. Le tre tensioni di fase (stellate) si dicono  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  e si ha:

$$E_i = 220V_{\text{eff}} \sin(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t + 120^\circ i)$$

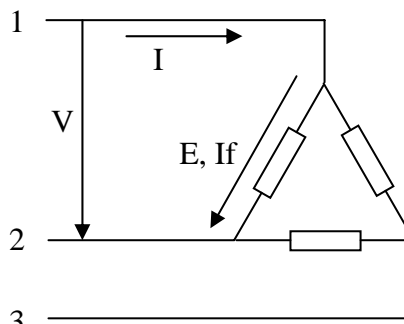
Le tre tensioni di linea (concatenate) si dicono  $V_{12}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_{31}$  e il loro valore efficace è pari a

$2 \cdot \cos(30^\circ) \cdot 220V_{\text{eff}} = \sqrt{3} \cdot 220V_{\text{eff}} = 380V_{\text{eff}}$  come si può facilmente intuire dal diagramma vettoriale a lato.

I carichi possono essere connessi a stella (3 carichi uguali tra fase e neutro) o a triangolo (3 carichi uguali tra fase e fase).



Carico a stella



Carico a triangolo

Nel caso di carichi a stella si ha  $V = \sqrt{3} \cdot E$  e  $I = I_f$ , mentre nel caso a triangolo si ha  $V = E$  e  $I = \sqrt{3} \cdot I_f$ . A parità di carico  $R$ , la potenza dissipata da quest'ultimo è pari a  $E^2/R = V^2/(3R)$  nel caso di collegamento a stella, e  $E^2/R = V^2/R$  nel caso di collegamento a triangolo. Dato che quindi la connessione a stella assorbe meno potenza, per dare potenza gradualmente ad un carico si è soliti alimentarlo nella connessione a stella quindi commutare alla connessione a triangolo (avviamento stella-triangolo).

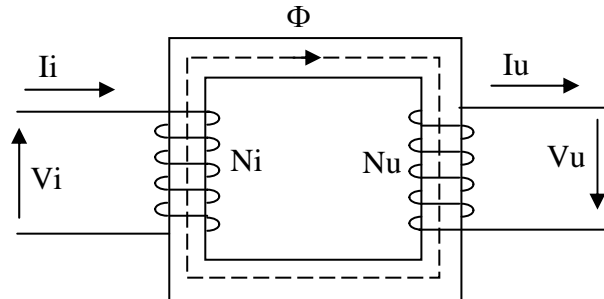
La potenza apparente di fase è data da  $S[V \cdot A] = E \cdot I_f$ , quindi per le tre fasi si ha  $S = 3E \cdot I_f = \sqrt{3}V \cdot I$  in entrambi i casi. Si rammenta che se lo sfasamento tra tensione di fase e corrente di fase è  $\varphi$ , la potenza attiva  $P$  è  $P[W] = \sqrt{3}V \cdot I \cdot \cos\varphi$  in entrambi i casi e la potenza reattiva  $Q$  è  $Q[\text{var}] = \sqrt{3}V \cdot I \cdot \sin\varphi$  sempre in entrambi i casi. La maggior parte dei carichi (motori) sono di tipo induttivo e pertanto, per limitare l'entità della potenza reattiva, nelle aziende si usano banchi di condensatori di rifasamento (sistemi a rifasamento statico).

E' possibile quindi avere sistemi utilizzatori monofase o trifase e a 220V o a 380V.

Le principali macchine elettriche si suddividono in:

- trasformatore
- motori
- generatori

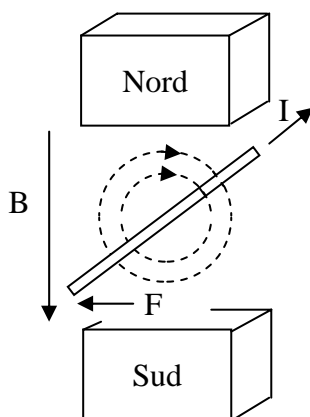
Il trasformatore riceve in ingresso potenza, in termini di tensione  $V_i$  e corrente  $I_i$ , e la restituisce in uscita variando correnti e tensioni sulla base di un rapporto di trasformazione  $k$ .



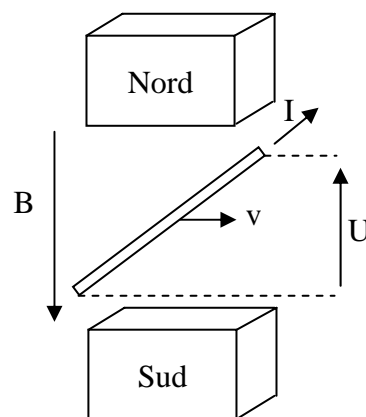
Un trasformatore monofase è formato da due avvolgimenti separati elettricamente e avvolti su un nucleo di ferrite nel quale si sviluppa un flusso magnetico  $\Phi$ . L'avvolgimento in ingresso, costituito da  $N_i$  spire, viene detto primario mentre quello in uscita, costituito da  $N_u$  spire, viene detto secondario. Il rapporto di trasformazione  $k$  è pari a  $k=N_i/N_u=V_i/V_u=I_u/I_i$ . Oltre che per variare le tensioni, i trasformatori vengono utilizzati anche per isolare elettricamente il carico dalla distribuzione di rete. Il trasformatore, con il suo comportamento induttivo, tende a filtrare le brusche variazioni di corrente del carico limitandone gli effetti in termini di disturbi sulla rete; per questo scopo, in assenza di trasformatori, vengono utilizzate delle induttanze o più comunemente dei filtri di rete, costituiti da circuiti LC.

Anche nelle macchine elettriche tipo motore o generatore vengono sfruttati i fenomeni magnetici e in particolare due effetti:

- 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)



Principio del motore



Principio del generatore

Un motore elettrico deve essere costituito da *parti costruttive* attive, che possono condurre il flusso magnetico lungo il percorso voluto con la minor possibile resistenza e senza grandi dispersioni, da *avvolgimenti*, che servono alla generazione del flusso magnetico, e da altri particolari costruttivi sia di sostegno che di conduzione quali coperchi, cuscinetti, portacuscini, alberi,... Parti costruttive e avvolgimenti possono essere suddivisi in due gruppi fondamentali, tipicamente separate da traferro:

- carcassa o statore (parte fissa)
- rotore (parte rotante)

Variando il tipo di statore (ad avvolgimento, mediante poli) o il tipo di rotore si ottengono diversi principi di motori (motore in corrente continua, motore in corrente alternata, motore, sincro, asincro,...).

Nel funzionamento di un motore, così come nel trasformatore, si verificano delle perdite  $V$ , per cui la potenza utilizzata  $P_u$  è inferiore alla potenza erogata  $P_e$ : le perdite stabiliscono il rendimento  $\eta$  di un motore ( $\eta = P_u/P_e$ ). Le perdite del motore, sia le perdite a vuoto (magnetizzazione, attrito, eccitazione) che quelle dovute al carico, si trasformano in calore. Il materiale isolante, i cuscinetti e gli altri elementi costruttivi non devono riscaldarsi eccessivamente, altrimenti la loro durata cala in modo drastico e, in generale, il rendimento cala. Il calore deve quindi essere asportato dal motore in modo rapido ed efficace. Tanto più efficace è stato previsto il raffreddamento del motore, tanto più piccolo potrà essere il motore a parità di potenza. Il raffreddamento viene ottenuto o a passaggio di aria (ventilazione naturale o ventilazione forzata mediante ventilatori esterni o previsti nel motore) o a circolazione di liquidi (la macchina o parte di essa viene percorsa da acqua o altro liquido o è immersa in tale liquido). Dato che il raffreddamento è così importante per le macchine elettriche, sono previste delle protezioni che in pratica controllano la temperatura del motore e, qualora vi sia superamento della soglia, spengono il motore.

Oltre al problema del raffreddamento delle macchine elettriche vi è il problema della protezione verso gli agenti esterni. I tipi di protezione vengono sempre contraddistinti da 2 lettere maiuscole (IP) seguite da due numeri: il primo indica il tipo di protezione da contatto esterno o da corpi solidi (0 = nessuna protezione, 1 = grandi corpi –mano-, 2 = corpi medi –dito-, 3 = corpi piccoli –spessore < 2.4mm, 4 = fili –spessore < 1mm-, 5 = deposito di polvere, 6 = protezione completa verso la polvere), mentre il secondo indica la protezione dai liquidi (0 = nessuna protezione, 1 = gocce di condensa, 2 = pioggia con inclinazione fino a 15°, 3 = pioggia con inclinazione fino a 60°, 4 = pioggia con qualunque inclinazione, 5 = temporanea inondazione, 6 = getti d'acqua da ogni direzione, 7 = penetrazione di acqua, 8 = acqua sotto pressione).

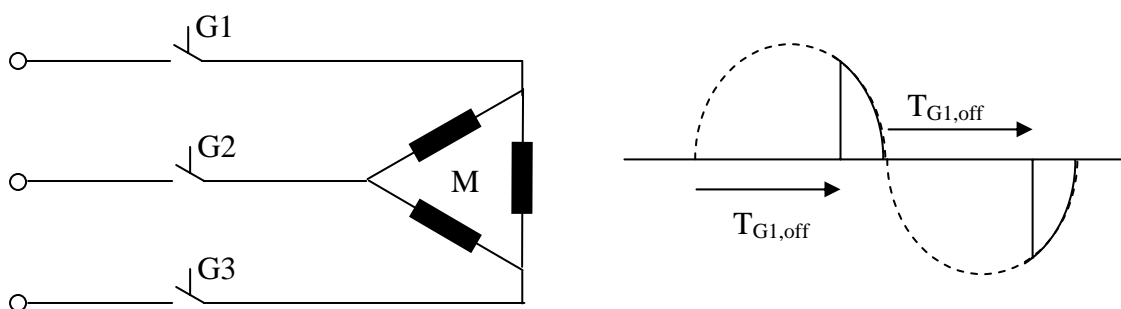
Il funzionamento di un motore viene contraddistinto dalle curve caratteristiche coppia-giri. Il motore gira a velocità costante quando la coppia motrice  $M$  ( $M = F \cdot r = B \cdot I \cdot m \cdot r$ , dove  $m$  è il numero di conduttori del rotore e  $r$  il raggio) è uguale alla coppia resistente. La potenza meccanica  $P$  della macchina risulta proporzionale al prodotto tra la coppia motrice  $M$  e il numero  $n$  di giri al minuto ( $P = F \cdot s/t = 2\pi r \cdot n \cdot F = 2\pi \cdot n \cdot M$ ). Se si considera il comportamento a vuoto, da fermo, si parla di condizioni statiche di funzionamento; se invece si prendono in considerazione anche dei periodi transitori (avviamento, frenatura, “presa di carico”) si parla di condizioni dinamiche.

Molti motori che vengono impiegati nel settore industriale sono motori in corrente alternata (ac induction motor) che possono essere connessi direttamente alla rete a 50Hz (50Hz = 3000rpm –round per minute-). A pieno carico e in velocità hanno un buon rendimento, tuttavia da fermi presentano una bassa impedenza e pertanto assorbono una

corrente molto elevata (fino a 6 volte del valore di corrente a pieno carico –Full load current FLC-) che si riduce mano a mano che il motore acquista velocità. Un altro importante parametro che caratterizza il funzionamento del motore all'avviamento è la coppia di spunto (breakaway torque), ossia la coppia del motore da fermo: per molte applicazioni è necessario avere un elevato valore di coppia di spunto. Il collegamento stella-triangolo è un semplice modo per limitare la corrente di avviamento, che tuttavia riduce anche la coppia di spunto e provoca brevi sovracorrenti durante la commutazione.

Per ottenere degli avviamenti controllati o, più in generale, la possibilità di regolare la velocità del motore, si utilizzano dei sistemi elettronici di potenza detti **azionamenti**.

### Soft starter



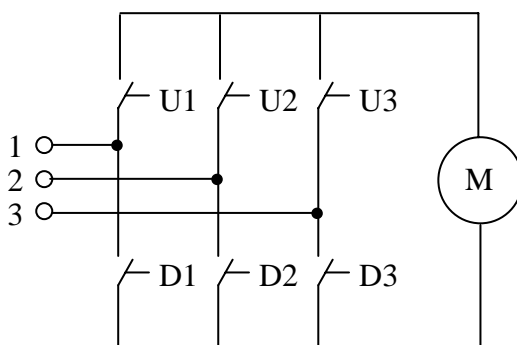
Lo schema indica come sia possibile regolare la tensione al motore semplicemente regolando l'angolo di apertura degli interruttori. Ovviamente ci sarà un'elettronica che, grazie a dei trasformatori sulla rete (trasformatori di sincronismo), regola l'accensione e lo spegnimento degli interruttori e quindi regola la tensione sul motore. Tipicamente la tensione sul motore viene impostata secondo una rampa lineare di salita con tempo variabile tra 1 e 25s. Il problema è che spesso la presenza del carico fa sì che serva una certa corrente per generare la coppia di spunto e far muovere il motore, altrimenti la potenza assorbita viene dissipata in calore: per questo motivo la rampa viene inizialmente accelerata. Ovviamente la velocità non si muove linearmente con la tensione: se il carico è leggero la velocità nominale viene raggiunta prima di dare la massima tensione, se invece il carico è pesante la velocità nominale viene raggiunta dopo aver dato la massima tensione. Invece della rampa in tensione è possibile regolare la rampa in corrente grazie a dei sensori di corrente a valle degli interruttori.

### Convertitori AC/DC

I motori in corrente continua hanno ottime caratteristiche statiche, in termini di accuratezza, e dinamiche nella regolazione della velocità in entrambe le direzioni di moto; inoltre non presentano vibrazioni attorno allo zero. La velocità viene regolata variando la tensione continua che deve essere ottenuta dalla tensione di rete mediante un convertitore AC/DC controllato. Oggi i motori in corrente continua sono quasi del tutto rimpiazzati dai motori brushless, la cui assenza di spazzole permette una più semplice manutenzione (vedi motori in corrente alternata).

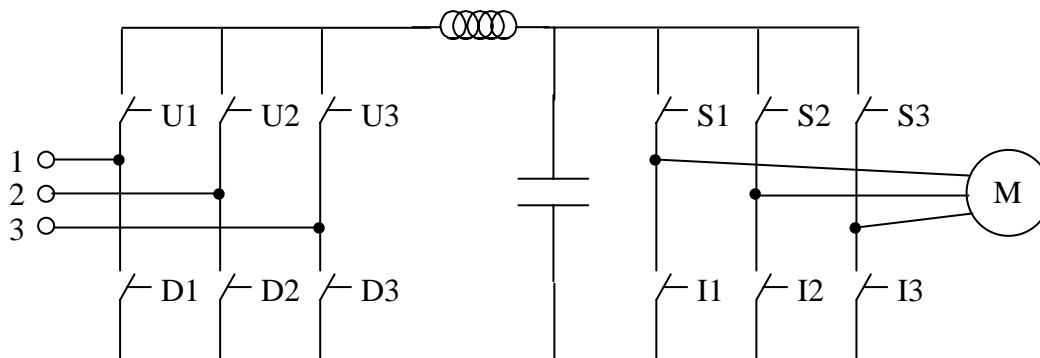
Il convertitore AC/DC è uno schema a interruttori dove è prevista un'apparecchiatura elettronica che regola il tempo di apertura e chiusura degli interruttori. Ciascuna coppia di interruttori agisce per  $1/6$  del periodo, dato che sul motore risultano in conduzione

naturale (interruttori sempre chiusi) le 3 fasi concatenate e le loro negate. La sequenza di conduzione naturale è U1-D2, U1-D3, U2-D3, U2-D1, U3-D1, U3-D2, U1-D2,....

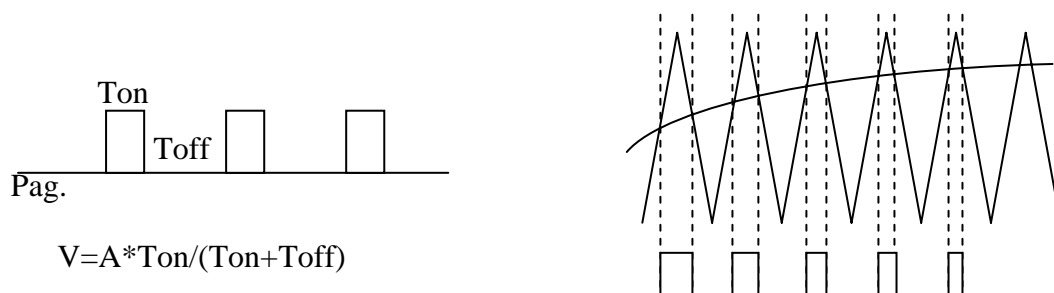


### Inverter

Nel caso di motori in corrente alternata, come nei motori a induzione (brushless), la velocità del motore viene regolata regolando la frequenza, mentre l'ampiezza del segnale fornisce potenza e quindi coppia. E' possibile regolare la frequenza e l'ampiezza delle tensioni sinusoidali applicate al motore mediante degli inverter. Un inverter è costituito da un convertitore controllato AC/DC come quello sopra seguito da uno stadio controllato DC/AC.

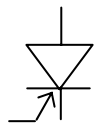


Per generare delle sinusoidi con degli interruttori a partire da una sorgente di tensione continua si utilizza la tecnica del PWM (Pulse Width Modulation). In pratica si utilizza il fatto che un'onda rettangolare di ampiezza A e duty cycle D ( $D = T_{on} / (T_{on} + T_{off})$ ), se viene filtrata passa-basso genera un segnale continuo di ampiezza V pari a  $V = A * D$ . Così, se ad esempio si vuole generare una sinusoide a frequenza f è possibile generare un segnale ad onda rettangolare che, se filtrato passa-basso, lascia passare solo la componente a f. Tale segnale a onda rettangolare può facilmente essere ottenuto come l'uscita di un comparatore che ha in ingresso una sinusoide a frequenza f e un'onda triangolare a frequenza molto maggiore di f.

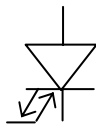


$$V = A * T_{on} / (T_{on} + T_{off})$$

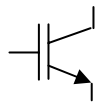
Per la realizzazione fisica degli interruttori si utilizzano dispositivi elettronici di potenza tra i quali, oltre a diodi e transistori bipolari e MOSFET di potenza (tipicamente fino a 100A), ci sono i seguenti dispositivi:



- TIRISTORE. E' un dispositivo a 4 strati PNPN che si comporta come un diodo con segnale di abilitazione (gate): fintanto che manca il segnale di gate il tiristore si comporta come un interruttore aperto, quando invece viene applicato il segnale di abilitazione il tiristore si comporta come un diodo e se viene polarizzato direttamente conduce e continua a condurre anche in assenza del segnale di gate. Per spegnere il tiristore è necessario annullare la corrente applicando una tensione inversa per un certo tempo. Per le strutture bidirezionali si utilizzano tiristori in antiparallelo.



- GTO (Gate Turn Off thyristor). E' un tiristore che si può spegnere applicando una tensione negativa al gate. Può rimpiazzare i tiristori e i tiristori veloci.

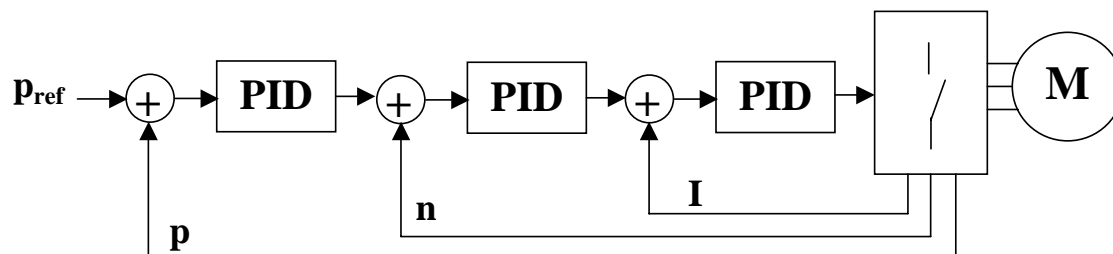


- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). E' un transistor che combina le caratteristiche dei transistori bipolari e MOSFET: è veloce come un MOSFET senza soffrire del problema delle perdite quindi può supportare maggiori potenze (MWatt).

I convertitori e la relativa elettronica di comando trova posto negli **azionamenti**, dei sistemi elettronici digitali che si occupano della regolazione della velocità e della corrente del motore. Un azionamento è costituito da una parte di controllo, in genere gestita da un microprocessore, e da una parte di potenza, ossia dal convertitore e dal controllo diretto degli interruttori. La parte di controllo è costituita da una sezione di regolazione, da una sezione di protezioni (massima corrente, massima tensione,...) e da una sezione di comandi, ossia una serie di ingressi e uscite logiche, in genere oggi sostituite da un canale di comunicazione numerico, per l'abilitazione, l'attivazione dei riferimenti, la segnalazione dello stato di funzionamento. Grande importanza ha oggi la parte di diagnostica. Per quanto riguarda la sezione di regolazione, in genere il controllo di corrente è il più veloce e il più interno ed è direttamente interfacciato al controllo dell'elettronica di potenza. Il riferimento di corrente coincide con l'uscita del regolatore di velocità, mentre il riferimento di velocità può essere l'uscita di un più esterno regolatore di posizione. L'azionamento può ricevere dal campo il riferimento di posizione o quello di velocità o direttamente quello di corrente e, dopo aver effettuato la regolazione della grandezza controllata, pilota l'elettronica di potenza, governa molte delle protezioni del motore (massima corrente, sensori termici,...) e fornisce indicazioni diagnostiche sullo stato del motore (corrente, velocità, stato delle protezioni,...). Un



azionamento è quindi fortemente connesso ai sistemi di controllo e supervisione a più alto livello (PLC, PMC,...) e lo scambio di informazioni è articolato e deve rispettare le tempistiche del controllo delle grandezze elettriche del motore. Si pensi infatti che la regolazione di corrente ha tempi di ciclo nell'ordine del ms, mentre la regolazione di velocità ha tempi di ciclo nell'ordine della decina di ms.



### Esempio di azionamento Siemens SIMODRIVE611

(<http://www.ad.siemens.de/mc/mc-sol/en/c3b5d82c-189b-43e4-a677-8c8f3429c8c4/index.aspx>  
[http://www3.ad.siemens.de/doconweb/content.asp?item=17280&cd=840D\\_1102\\_E&scope=all](http://www3.ad.siemens.de/doconweb/content.asp?item=17280&cd=840D_1102_E&scope=all) )



## 1.2 Sensori e attuatori

In questo capitolo si accenna brevemente ai componenti che operano a livello più basso, ossia i sensori, che servono per acquisire le informazioni fisiche, elettriche, ambientali,..., e gli attuatori, detti anche dispositivi di comando, che servono per agire sull'impianto, come ad esempio gli azionamenti visti nel paragrafo precedente.

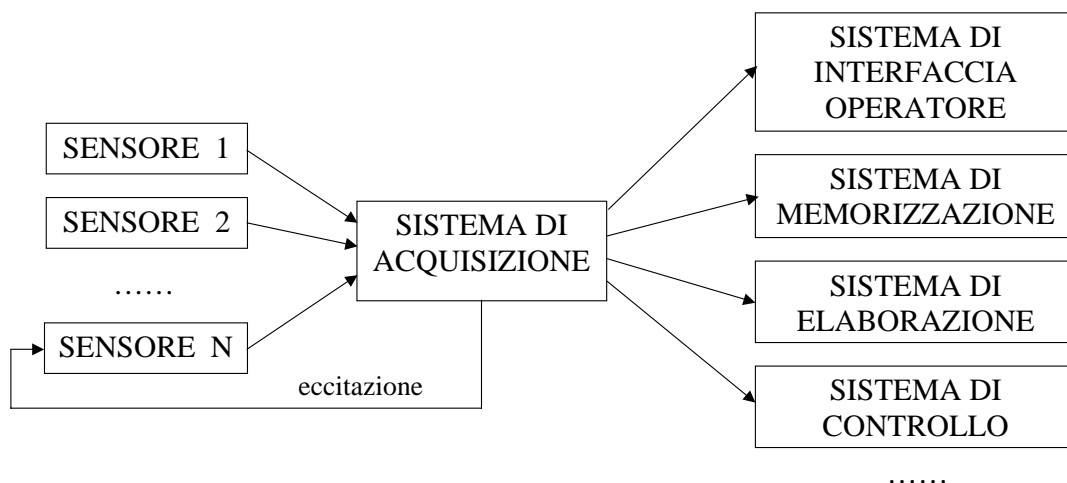
### Sensori

Le grandezze fisiche da rilevare nei processi industriali possono essere di varia natura; generalmente queste quantità sono difficili da trasmettere e da elaborare nella loro forma originaria. Di conseguenza, l'obiettivo fondamentale di un sensore è quello di convertire una grandezza fisica in ingresso in un'altra grandezza più facile da manipolare. Una peculiarità del processo di trasduzione è la conversione dell'energia da una forma (in ingresso) ad un'altra (in uscita).

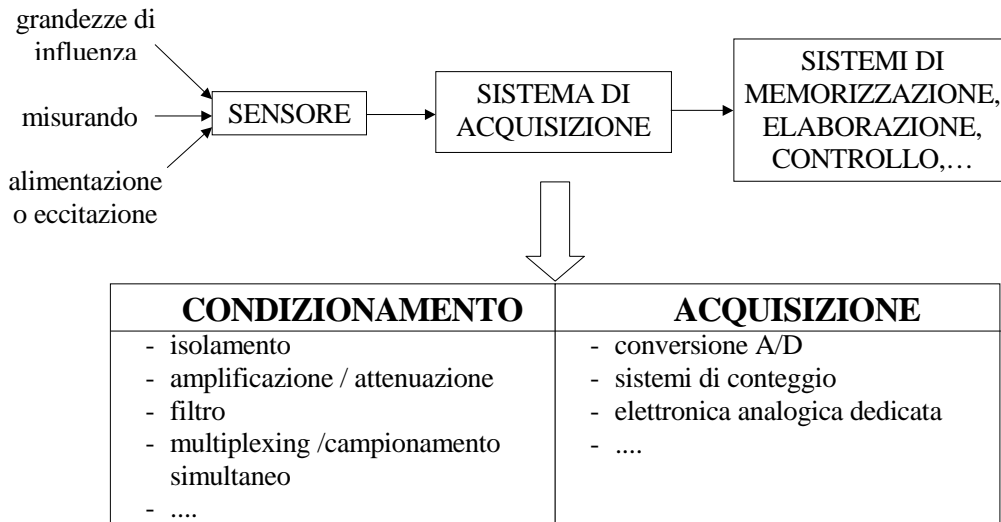
La classificazione dei sensori può avvenire in base al principio fisico (ottico, meccanico, elettrico,...), alla grandezza da misurare (temperatura, corrente,...) o in base al settore di destinazione (agricoltura, manifatturiero, robotica,...).

I sensori possono anche essere classificati tra **sensori attivi** e **sensori passivi** in base alla necessità o meno di richiedere una potenza esterna per poter funzionare. I sensori attivi non richiedono potenza dall'esterno per fornire il segnale in uscita derivante dall'applicazione della variabile di processo (es. sensori che utilizzano l'effetto piezoelettrico, l'effetto fotoelettrico,...). Questi dispositivi presentano in uscita un basso valore di energia per cui richiedono in genere un'opportuna amplificazione. I sensori passivi richiedono potenza dall'esterno per fornire il segnale in uscita derivante dall'applicazione della variabile di processo (es. sensori resistivi, capacitivi,...).

I sensori necessitano di sistemi di acquisizione (interfaccia, preelaborazione) prima dell'uso finale (controllo, memorizzazione e visualizzazione dell'informazione).



In molti casi la circuiteria relativa all'acquisizione viene integrata nel sensore stesso, mentre in altri casi deve essere svolta dall'utilizzatore finale dell'informazione. Tale circuiteria si compone di una parte di condizionamento, dove il segnale di uscita del sensore viene amplificato, isolato e comunque reso idoneo per la trasmissione e l'acquisizione da parte di un convertitore A/D o di un contatore.



I sensori differiscono molto in quanto ad esigenze di acquisizione pertanto i sistemi di condizionamento e le tecniche di preelaborazione sono studiate “ad hoc” per ogni specifico sensore e, naturalmente, questo rende complesso l’interfacciamento al sensore e la relativa gestione dell’informazione. Per poter interfacciare e gestire un sensore, questo deve essere caratterizzato.

Una caratterizzazione completa del sensore richiede la descrizione delle seguenti caratteristiche:

- statiche (descrivono le prestazioni del sensore in condizioni normali con variazioni lente dell’ingresso ed in assenza di sollecitazioni esterne)
- dinamiche (descrivono il comportamento del sensore alle variazioni dell’ingresso con il tempo)
- 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)
- di affidabilità (sono relazionate alla vita utile del sensore e a possibili cause di mal funzionamento nel sistema in cui è inserito)

### **Caratteristiche statiche**

Per ogni sensore esiste una relazione di ingresso-uscita ideale, detta caratteristica di funzionamento ideale, che permette di ottenere in uscita, generalmente in un’altra forma, il valore “vero” dello stimolo o misurando  $m$ . Questa funzione ideale  $f$  viene espressa sotto forma di equazione matematica, di tabella o di grafico; può essere di tipo lineare o non lineare e in genere dipende, oltre che dal misurando, anche da altre grandezze, generalmente dette grandezze di influenza  $m_i$ .  $Out = f(m, m_i)$

Il sensore reale ha un comportamento che si discosta dalla caratteristica di funzionamento ideale e tale scostamento viene talvolta identificato con l’errore del sensore. Il modo più immediato di considerare l’errore del sensore è quello di definire la sua fascia di incertezza  $[\pm \%FSO]$  che rappresenta la massima deviazione dalla sua retta di riferimento, dato che in genere i sensori tendono ad avere una relazione lineare tra uscita e misurando. La scomposizione dell’errore totale nelle sue componenti (non linearità, guadagno, offset, ecc.) può essere utile per effettuare la correzione finale dei dati e migliorare l’accuratezza complessiva. Le caratteristiche di errore possono essere

determinate con la **calibrazione (o taratura)**. La calibrazione è un test durante il quale si applicano al sensore dei valori noti e si registra il valore del segnale di uscita del sensore: in questo modo è possibile costruire per punti la caratteristica reale del sensore.

Non entreremo nei dettagli delle caratteristiche dei sensori, ma ci limiteremo alla descrizione dei principali parametri. Tra le caratteristiche statiche ricordiamo:

- **Range** [FS]. Lo *span* o *range* o *portata* è l'intervallo dinamico di ingresso (massimo valore meno minimo valore) che può essere convertito dal sensore con una incertezza prestabilita.
- **Full Scale Output** [FSO]. Il *full scale output* è la differenza fra i segnali di uscita del sensore quando ad esso sono applicati i valori estremi del range.
- **Isteresi** [%FSO]. Rappresenta la massima differenza tra i valori di uscita corrispondente ad uno stesso ingresso, ottenuto per valori crescenti e decrescenti.
- **Ripetibilità** [entro...%FSO] Rappresenta la 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.
- **Risoluzione** [%FSO] (detectivity) Rappresenta l'abilità del trasduttore nel rivelare il segnale di ingresso (limitata dal rumore da esso prodotto). Il minimo segnale rilevabile è definito come il segnale di ingresso che produce un SNR di uscita unitario: in assenza di segnale in ingresso il trasduttore produce in uscita una data potenza di rumore; di conseguenza il minimo segnale rilevabile è quello che per essere rilevato deve avere una potenza almeno uguale a quella di rumore.
- **Linearità** [entro  $\pm$ ...%FSO]. Indica lo scostamento della curva di taratura sperimentale dalla retta di riferimento (r.r.) ottenuta dai dati sperimentali di calibrazione. Sono possibili diversi tipi di rette di riferimento: 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). E' il rapporto tra il segnale di uscita e la grandezza trasdotta calcolata sulla retta di riferimento. L'**offset** è il segnale di uscita in assenza di stimolo. Particolare importanza (es. sensori chimici) riveste la sensibilità trasversale (cross sensitivity), ossia la sensibilità del sensore rispetto a grandezze diverse dal misurando, quali la temperatura, l'umidità,....

### Caratteristiche dinamiche

Le caratteristiche dinamiche in un sensore descrivono il suo comportamento in condizioni di variazioni (rapide) dell'ingresso con il tempo. Un sensore non sempre risponde "istantaneamente" a stimoli di ingresso variabili nel tempo e questo determina una sorta di "errore" nella sua risposta. Tale errore è dipendente dal tempo e può produrre delle oscillazioni se il sensore è inserito in un sistema di controllo. Tra le caratteristiche dinamiche abbiamo:

- **Risposta in frequenza** [  $\pm$ ..% da ..a.Hz] Rappresenta la variazione del rapporto fra ampiezza di uscita e ampiezza di ingresso, o della differenza fra la fase di ingresso e quella 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. Il tempo di risposta è il tempo necessario affinché l'uscita raggiunga una specificata percentuale del valore finale (al 95%

o al 98%). Il tempo di salita è il tempo necessario affinché l'uscita vada da un prefissato valore ad uno maggiore definiti in percentuale del valore finale (10%-90% o 5%-90%). La costante di tempo è il tempo necessario affinché l'uscita raggiunga il 63% del valore finale.

### **Caratteristiche ambientali**

Tra le caratteristiche ambientali ricordiamo l'errore di temperatura [%FSO] che rappresenta il massimo scostamento dell'uscita a parità di ingresso al variare della temperatura in un determinato range, o l'errore di vibrazione [%FSO] che rappresenta il massimo scostamento dell'uscita del sensore a parità di misurando quando al sensore sono applicate vibrazioni di ampiezza e frequenza prefissate.

### **Caratteristiche di affidabilità**

Per quanto concerne l'affidabilità, oltre ai classici parametri che indicano la vita media fino al guasto, spesso sono indicati i tempi medi oltre i quali il sensore può non rispettare alcune delle sue caratteristiche di funzionamento (degrado del sensore).

### **Tipologie di sensori**

Di seguito viene fornita una breve panoramica dei tipi di sensori esistenti sul mercato, sulla base del loro principio di funzionamento.

- **Sensori resistivi.** Nei sensori resistivi la variazione del misurando genera una variazione di resistenza, ossia applicando una tensione al sensore si osserva una variazione di corrente. Dato che la resistenza  $R$  [ $\Omega$ ] di un parallelepipedo è  $R = \rho \cdot l / s$ , dove  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] è la resistività del materiale,  $l$  è la lunghezza [m] e  $s$  la sezione [ $m^2$ ]. La resistenza  $R$  può essere variata facendo variare la lunghezza, come nei potenziometri a cursore mobile per la rilevazione dello spostamento; oppure può variare la resistività, ad esempio per effetto della temperatura (termoresistori) o della mobilità dei portatori (sensori chimici); oppure possono variare lunghezza e sezione, ad esempio per effetto di compressione o stiramento (estensimetri). La circuiteria di condizionamento prevede un generatore di corrente con relativa lettura della tensione oppure l'inserimento in ponti di Weathstone per la rilevazione di variazioni anche piccole. Per misure ad elevata risoluzione si deve tener conto del rumore termico associato al resistore  $v^2 = 4kTR\Delta f$  ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$ ,  $\Delta f$  = banda della misura).
- **Sensori capacitivi.** I capacitori sono combinazioni di armature in grado di immagazzinare carica elettrica. Se si considerano due conduttori piani di area  $A$  a distanza  $d$  connessi ad una batteria si osserverà che essi riceveranno uguale quantità di carica ma di segno opposto; questi conduttori rimarranno carichi per un tempo teoricamente infinito anche dopo aver staccato la batteria. I capacitori sono dunque elementi caratterizzati dalla carica e dalla differenza di potenziale sulle armature. Per un condensatore a facce piane si ha:  $C$  [F] =  $Q/V = \epsilon_0 \epsilon_r A/d$ , dove  $\epsilon_0$  [F/m] è la permittività assoluta (costante dielettrica) del vuoto, mentre  $\epsilon_r$  è la permittività relativa del mezzo. Si possono avere sensori di spostamento (variazione di  $d$ ) o sensori di livello, chimici o di umidità (variazione di  $\epsilon_r$ ): in quest'ultimo caso è importante specificare range di frequenza e temperatura a causa della variabilità in molti materiali della costante dielettrica con temperatura e frequenza (che decresce all'aumentare di queste due quantità). La

circuiteria di condizionamento prevede l'inserimento del sensore in circuiti oscillanti seguiti da contatori per la stima di frequenza.

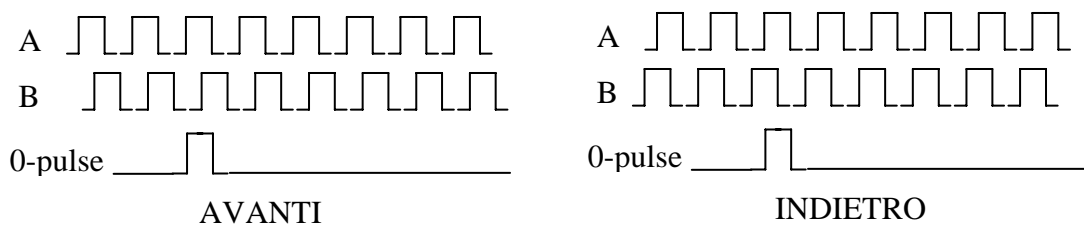
- **Sensori induttivi.** Gli induttori sono elementi caratterizzati dalla proprietà di presentare una tensione ai loro capi quando sono sottoposti ad una variazione di corrente; essi rispondono con una forza elettromotrice che si oppone alla variazione di corrente che l'ha generata, in modo proporzionale all'induttanza  $L[H]$ , secondo la legge  $V=-Ldi/dt$ . In pratica l'autoinduttanza di un induttore è funzione del materiale (permeabilità  $\mu_r$ ), della geometria (lunghezza  $l$ , sezione  $A$ ) e del numero di spire  $n$  secondo la relazione  $L=\mu_0\mu_rA*n^2/l$ , dove  $\mu_0=4\pi*10^{-7}$  H/m è la permeabilità assoluta del vuoto. Le variazioni di  $l$ ,  $n$ ,  $\mu_r$  si possono ottenere per inserimento di nucleo, per trazione o compressione, per scorrimento: questi fenomeni fisici vengono rilevati come variazione di induttanza del materiale. Come nel caso dei sensori capacitivi, i sensori induttivi vengono in genere inseriti in circuiti oscillanti.
  
- **Sensori magnetici.** Per i trasduttori magnetici la variazione del misurando è convertita (generalmente) in variazione di campo magnetico o di forza elettromotrice indotta. Ci sono vari tipi di sensori magnetici. Vi sono sensori di velocità basati sulla legge di Faraday (se un conduttore di lunghezza  $l$  si muove con velocità  $v$  in un campo magnetico  $B$  allora si genera una tensione  $E = B*l*v$ ), sensori di forza o di vibrazioni basati sull'effetto magnetostrittivo (alcuni materiali variano le dimensioni se sottoposti ad un campo magnetico), sensori di campo magnetico basati sull'effetto magnetoresistivo (materiali magnetizzati che, in presenza di campo magnetico esterno, variano la loro resistività), sensori di campo magnetico, corrente o spostamento basati sull'effetto Hall (se in un conduttore a forma di nastro di spessore  $s$  viene fatta passare una corrente  $I$  perpendicolare alla direzione del campo magnetico esterno  $B$ , si genera una differenza di potenziale  $E = K*I*B/s$  tra gli estremi della larghezza del nastro <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html>).  
Particolare importanza nell'automazione rivestono i sensori di prossimità induttivi (proximity sensor): se un oggetto metallico entra nel campo spaziale del sensore, il sensore produce un'uscita logica.
  
- **Sensori piezoelettrici.** L'effetto piezoelettrico (*piezo=fare pressione*) descrive la peculiarità di alcuni materiali di generare cariche elettriche quando sono sottoposti a sollecitazione. Questi elementi sono elettricamente neutri ma se su essi agisce una forza  $F$  il loro reticolo si deforma sviluppando un eccesso di carica in superficie. Questo fenomeno è reversibile di modo che l'applicazione di una differenza di potenziale produrrà una deformazione meccanica. E' bene sottolineare che non si osserva nessuna differenza di potenziale sia in assenza di sollecitazione sia in presenza di sollecitazione statica ma soltanto nel caso di variazioni di sollecitazione. I sensori piezoelettrici sono utilizzati per misure di forza, pressione o vibrazione, ma sono notevolmente sensibili alla temperatura.
  
- **Sensori termoelettrici.** Oltre ai sensori termoresistivi (Es. PT100), basati sulla variazione di resistività al variare della temperatura (v. sensori resistivi),

esistono sensori per la misura della temperatura basati sull'effetto Seebeck, Peltier, Thomson. La variazione di temperatura si traduce in una variazione di forza elettromotrice (termocoppia

<http://www.thermo-electric-direct.com/PDFTechFiles/ThermocoupleTheory.pdf>).

- **Sensori chemielettrici.** Descrivono la proprietà di alcuni elementi o composti di variare le proprie caratteristiche elettriche quando sono interessati da particolari reazioni chimiche. In genere questi effetti sono 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; In pratica quando un fotone colpisce la superficie di un materiale può aversi generazione di elettroni liberi (*effetto fotoelettrico*). Se il fotone che colpisce la superficie del materiale non ha energia sufficiente ad estrarre l'elettrone si potrà avere un aumento di conduttività del materiale (*effetto fotoconduttivo*) o la comparsa di una forza elettromotrice (*effetto fotovoltaico*). Troviamo esposimetri, fotodiodi, fototransistor e cellule fotoelettriche per la rilevazione di sorgenti luminose utilizzati, tra l'altro, per la trasduzione di distanza o di presenza.

Tra i sensori ottici, data la loro importanza in tutti gli azionamenti a velocità variabile, hanno un posto speciale gli **encoder**. Si tratta di dispositivi che forniscono un segnale ad onda quadra con  $m$  impulsi per ogni giro del motore: se il motore ha velocità angolare  $w$ , allora il segnale in uscita dall'encoder avrà frequenza  $m*w$ . In realtà i segnali in uscita dall'encoder sono 3: due segnali (A e B) in quadratura che determinano la velocità e il verso di rotazione e un segnale che fornisce un impulso ad ogni giro e che per questo viene detto impulso di zero (0-pulse). I circuiti di acquisizione dei segnali da encoder devono essere veloci e operare in tempo reale.



### Attuatori

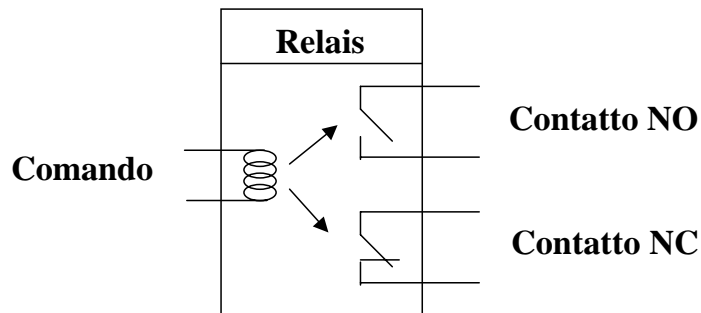
Gli attuatori sono organi di comando e, come i sensori, possono essere di tipo discreto o continuo; si possono avere attuatori di tipo ON/OFF, come ad esempio delle lampade, o attuatori di tipo continuo, come un azionamento a velocità variabile (velocità variabile in modo continuo da zero alla velocità nominale).

L'attuatore può essere pilotato da un operatore, come nel caso di manopole, pulsanti,...oppure da un sistema automatico, come un controllore logico programmabile (PLC). In genere, anche quando il comando viene effettuato da un operatore, è il sistema automatico che riceve il comando (es. si accorge che è stato premuto il pulsante

“avvia motore 1”) e pilota l’attuatore (es. chiude l’interruttore che porta tensione al motore 1): tuttavia le logiche di sgancio (es. pulsante di emergenza) devono essere ridondate e avere dei percorsi il più diretti possibile. Si è sempre parlato di motori elettrici, tuttavia sono molto utilizzati anche gli attuatori pneumatici e idraulici. Gli attuatori sono molteplici e vanno oltre lo scopo di questa trattazione; ci si limiterà quindi ad esaminare alcuni esempi.

Le lampade costituiscono un classico esempio di attuatore utilizzato per segnalazione (esiste una normativa che regola il significato dei colori delle segnalazioni). Esistono lampade pilotate in corrente continua e lampade pilotate in corrente alternata, a 24V (tensione ausiliaria generalmente presente per i comandi) o a 220V. Un altro importante gruppo di attuatori è costituito dagli apparecchi termici: di tale gruppo fanno parte i forni, gli impianti di raffreddamento e di riscaldamento. Tipicamente sono possibili due diverse strategie di regolazione: regolazione continua della tensione applicata al riscaldatore oppure regolazione ON/OFF del duty cycle di conduzione del riscaldatore. Tra gli attuatori elettromagnetici si hanno i magneti di arresto, gli elettromagneti di sollevamento, i deviatori elettromagnetici, i giunti e le valvole. Un semplice attuatore elettromagnetico è l’interruttore con cui ad esempio è possibile dare o togliere tensione ad un motore. L’interruttore viene armato (chiuso) manualmente o con comando automatico e si apre automaticamente. Si tratta di un attuatore binario, dato che è possibile impostare solo le condizioni “contatto aperto” e “contatto chiuso”. Il contattore (relais), invece ha una bobina di comando e può gestire più contatti a diversa polarità.

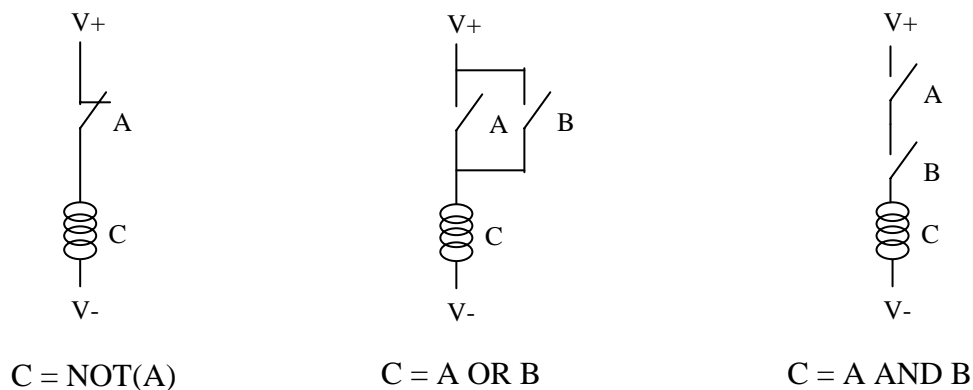
I relais sono essenzialmente delle valvole, come indicato in figura: eccitando la bobina di comando, i contatti normalmente aperti (NO) si chiudono, permettendo il flusso di corrente, e i contatti normalmente chiusi (NC) si aprono, interrompendo il flusso di corrente.



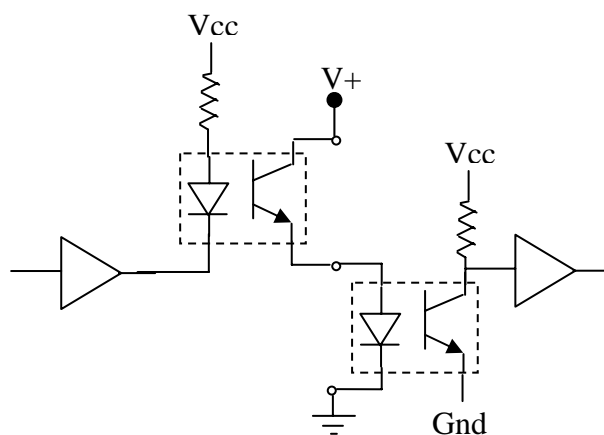
I relais sono degli amplificatori di potenza: infatti se la bobina di comando viene eccitata con 100mA, il contatto può portare più di 10A. Si tratta di dispositivi lenti: il tempo di apertura o di chiusura di relais di una certa potenza possono superare anche i 10ms. La semplicità del dispositivo, insieme all’elevato isolamento tra bobina e contatti, all’economicità e alla possibilità di essere facilmente utilizzati da personale non esperto, rende i relais molto utilizzati sia come contattori che per l’amplificazione di comandi provenienti da sistemi elettronici che in genere gestiscono segnali a bassissima potenza (<100mW). I relais possono essere utilizzati anche per la realizzazione di semplici funzioni logiche e, storicamente, le prime logiche di automazione sono state realizzate mediante connessione di relais a bassa potenza. Nella figura seguente vengono indicate



le principali funzioni logiche realizzate a relais. Nel caso però di realizzazione di funzioni logiche più complesse, i relais risultano lenti, ingombranti e caratterizzati da elevati consumi di potenza che, tra l'altro, inquinano elettromagneticamente l'ambiente.

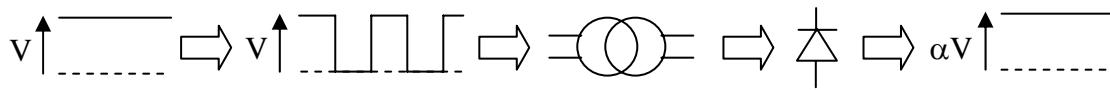


In realtà, per l'acquisizione di informazione nel settore manifatturiero è spesso più importante sapere la modalità di interfacciamento e di gestione del sensore, piuttosto del principio fisico che ne contraddistingue il funzionamento. Ovviamente lo stesso discorso vale per gli attuatori. Sensori e attuatori logici scambiano soltanto un'informazione binaria, che tipicamente appare come un contatto pulito: è sufficiente applicare una tensione e verificare la presenza del passaggio di corrente. Un simile segnale è molto semplice da amplificare in termini di potenza, ad esempio mediante un relais, è altrettanto semplice da isolare, ad esempio mediante un isolatore galvanico, ed è molto semplice da trasmettere, avendo un'elevata immunità al rumore. Di seguito viene mostrato uno schema di connessione tra ingressi e uscite logiche isolate galvanicamente. Si noti come i due sistemi non abbiano la massa in comune con il cavo: se ad esempio si suppone che il cavo di connessione vada in corto con la 380V, l'informazione non potrebbe essere più trasmessa, tuttavia sia il sistema a monte che quello a valle sarebbero esenti da guasti.



Più critica è la gestione delle informazioni continue: ad esempio un segnale di tensione continua variabile con continuità tra 0 e 5V è difficile da isolare e da

trasmettere. Infatti il segnale dovrebbe essere prima parzializzato, ad esempio con duty cycle 50%, quindi isolato mediante trasformatore, e infine raddrizzato.



Più robusta rispetto al rumore elettromagnetico è la trasmissione di segnali in corrente, per cui si utilizza la modalità 4-20mA che, tra l'altro, non contempla l'assenza di corrente (0mA) permettendo una facile diagnostica della situazione di "strappo cavi". Dato che la trasmissione "digitale" presenta notevoli vantaggi rispetto alla trasmissione di segnali "analogici", talvolta l'informazione viene codificata nella frequenza o nel duty cycle di un segnale ad onda quadra e, sempre più frequentemente, il sensore converte l'informazione in modo numerico e la trasmette in modo seriale: a questo proposito si rimanda al capitolo inerente i bus di campo, nati appunto per la trasmissione di informazioni a livello di sensori e attuatori.

### 1.3 PLC, PMC, Computer industriali

In questo capitolo si accenna brevemente ai sistemi computerizzati utilizzati nei principali settori produttivi particolarmente interessati all'automazione. I principali elaboratori che operano a livello industriale si possono suddividere in più categorie:

1. Robot
2. Macchine a controllo numerico
3. Unità intelligente per il controllo (comando, segnalazione, regolazione)
4. Unità intelligente per la supervisione e l'interfaccia operatore
5. Unità intelligente per il rilevamento, la memorizzazione, la trasmissione e la gestione (diagnosi, controllo di processi lenti) dei dati

In realtà tale suddivisione è solo indicativa, in quanto oggi si tende a computerizzare (dotare di un sistema di elaborazione) molti oggetti "tradizionali", come ad esempio i pallet. I pallet sono dei portaoggetti che in genere scorrono su vie a rulli per movimentare oggetti, semilavorati e prodotti finiti; spesso vengono dotati di intelligenza e memoria così da essere in grado di riconoscere e contare gli oggetti trasportati e da trasportare, oltre agli oggetti, anche l'informazione inerente l'oggetto (es. quali interventi, manipolazioni, controlli deve subire l'oggetto). Questa "computerizzazione" anche ai più bassi livelli è dovuta alla crescente disponibilità di processori a basso costo (microcontrollori  $\approx 1\text{€}$ ) che integrano tutte le risorse (memorie, periferiche) per la realizzazione di semplici sistemi programmabili.

I **robot** sono macchine elettromeccaniche automatiche dotate di scarsa capacità di elaborazione e di scarsa capacità di memorizzazione e trasmissione dell'informazione gestita. Alcuni non sono completamente automatici e sono controllati dagli esseri umani a distanza usando TV a circuito chiuso o altri sistemi di feed-back. Si tratta di sistemi costituiti da sensori, attuatori e sistemi di elaborazione residenti molto specializzati ad un singolo compito. La maggior parte sono usati per spostare componenti verso e dalle macchine utensili. Altri sono usati per maneggiare i dispositivi di lavorazione quali saldatrici a punto, saldatrici l'arco e gli spruzzatori della vernice. Altri sono usati come manipolatori a distanza in mare profondo, in laboratorio radioattivo, in satellite, in fabbrica calda e pericolosa ed in altri ambienti ostili agli esseri umani. Alcuni sono mobili e si muovono sulla terra, sul mare, o sull'aria, azionati con le rotelle, le eliche dell'acqua e le eliche dell'aria (o i getti). Vi sono in commercio robot per la misura e il controllo di qualità, robot di manipolazione per l'esecuzione del lavoro, robot da 2 a 7 assi come bracci meccanici per lo spostamento di oggetti, .... I robot sono in genere dotati di qualche linea di ingresso/uscita per il comando e le principali segnalazioni; alternativamente vengono controllati da comandi direttamente provenienti dall'operatore. I comandi umani si estendono dai pulsanti di comando semplici fino le barre di comando con risposte della forza. I sistemi di comunicazione includono la radio, il sonar, la fibra ottica ed il cavo elettrico. Molti robot sono costruiti ad emulazione del braccio umano. Altri (cartesiano) hanno impilato gli scorrevoli lineari, come in una fresatrice ed altri sono ibridi di questi. Tutti sono limitati dall'impossibilità di abbinare la possibilità della mano umana sotto controllo dell'occhio e del cervello umani. La programmazione del robot può avvenire in due modi: l'operatore inserisce il programma mentre il robot è fermo (on-line programming), oppure il programma viene sviluppato da un computer esterno mentre il robot continua il suo operato. Un

programma per robot consta di “posizioni” (coordinate obiettivo) e “step” (istruzioni, come “aspetta lo start”, “blocca il mandrino”,...).

Il **controllo numerico** (CN) per macchine utensili (MU) è anch'esso un elaboratore molto specializzato verso un singolo compito: in genere consente di movimentare organi meccanici, verificando in tempo reale la velocità e la posizione dell'organo nello spazio. Il costruttore di CN opera in sintonia con il costruttore di MU per consentire la realizzazione anche di macchine personalizzate: i parametri riguardano la quantità e la tipologia degli assi, le misure e le corse, le velocità/accelerazioni,... L'operatore programma il CN, che quindi dispone di tastiera e video o integra o si interfaccia ad un PC, impostando il ciclo di lavoro, come ad esempio una fresatura, una tornitura,.... I CN o CNC (Computer Numeric Control) integrano quindi un computer dedicato, il controllo degli assi cartesiani (un circuito per ogni asse) e la parte di ingresso uscita per la connessione con la parte di potenza della MU. Oggi si parla sempre più di DNC (Direct Numeric Control) intendendo CN a controllo digitale (regolazione effettuata mediante processore) direttamente interfacciati ad un computer supervisore. Infatti l'efficienza e la qualità di un CN dipende dalla possibilità di automatizzare la fase di programmazione che altrimenti rallenta il ciclo produttivo (un nuovo programma deve essere inserito, testato,...). La programmazione si avvale quindi di strumenti CAD e il supervisore integra un database di “lavorazioni elementari o comunque note” (archivio disegni/programmi) che vengono trasmessi alle MU. Più in generale un supervisore è un computer industriale nella cui memoria sono presenti molti programmi, tutti pronti per essere trasmessi in tempo reale ai singoli controlli delle MU. Il colloquio tra supervisore e MU è bidirezionale: infatti il supervisore dispone di una vasta gamma di dati che vengono via via raccolti con il procedere delle lavorazioni e quindi può mantenere un costante monitoraggio della produzione (numero di pezzi prodotti per macchina, tempi di fermo, utilizzo degli utensili,...). Per aumentare la disponibilità della linea di produzione in caso di guasto del supervisore, si tende a prevedere o una semplice e veloce commutazione delle macchine utensili in configurazione "stand-alone" o uno o più computer supervisori di riserva, interfacciati in tempo reale al supervisore principale così da poter intervenire immediatamente all'atto del malfunzionamento; spesso i computer di riserva vengono utilizzati contemporaneamente per lo sviluppo del software che verrà poi inviato al supervisore attivo.

Come si è visto i robot e le macchine a controllo numerico sono unità intelligenti dedicate ad un compito ben preciso. Si tratta di sistemi programmabili dall'operatore o da altre macchine, tuttavia l'operatore, più che creare programmi “ex novo”, si limita a configurare i cicli di lavoro che sono stati progettati dal costruttore. Il programmatore di una macchina a controllo numerico è quindi una figura professionale ben diversa da colui che realizza programmi di gestione della contabilità per un PC. Mentre il secondo è un progettista informatico, ossia una figura professionale che, pur non conoscendo nei dettagli l'hardware o il software di base (sistema operativo) del PC, progetta delle strutture dati e un programma in grado di realizzare le funzioni desiderate, il secondo è un ottimo conoscitore dell'hardware, ossia della macchina a controllo numerico, per cui conosce come una variazione di velocità di un mandrino possa influenzare la qualità della lavorazione, mentre le sue competenze informatiche possono essere più limitate.

Oltre alle unità intelligenti dedicate, più “configurabili” che “programmabili”, vi sono unità intelligenti molto versatili ad elevato livello di programmabilità. Tali unità vengono impiegate per svolgere le funzioni di comando e segnalazione, la gestione

delle protezioni e degli allarmi, le regolazioni, il coordinamento degli azionamenti di una stessa cella di lavorazione, il rilevamento, la memorizzazione e la trasmissione dei dati inerenti la lavorazione in oggetto, l'interfaccia con l'operatore (HMI Human Machine Interface). Le funzioni appena elencate sono molto diverse tra loro se tradotte in termini di potenza di elaborazione, capacità di memoria, tempo di calcolo o di intervento, semplicità d'uso: così, ad esempio, la funzione di coordinamento e regolazione degli azionamenti di celle di laminazione adiacenti deve essere svolta in stretto tempo reale per consentire una corretta regolazione del "tiro" del materiale laminato, mentre tali stringenti requisiti di velocità non sono richiesti al sistema preposto alla memorizzazione dei dati di processo che invece deve ovviamente avere un'ottima capacità di memoria e buone caratteristiche di trasmissione delle informazioni e, più in generale, di integrazione. Un sistema di diagnostica e supervisione deve essere dotato di ottime capacità di elaborazione, così da poter ospitare complessi algoritmi di ottimizzazione, mentre il sistema dedicato alla gestione degli allarmi e segnalazioni deve essere programmabile anche da operatori non altamente qualificati, in quanto l'aggiunta di una segnalazione non deve comportare grossi costi di modifica del programma.

Le unità intelligenti predisposte ai compiti sopra esposti si possono ripartire in 3 categorie, alle quali vanno aggiunti i pannelli dedicati alla supervisione:

- PLC (Programmable Logic Controllers)
- PMC (Programmable Multifunction Controller)
- PC industriali

I PC industriali sono dotati di sistemi operativi standard e programmi grazie ai quali è possibile sviluppare rapidamente delle applicazioni. Il loro limite consiste nel basso supporto di linee di ingresso uscite e nella difficoltà di realizzazione di applicazioni in tempo reale. I PLC sono sistemi orientati allo svolgimento di sequenze logiche temporizzate, ma oggi vengono impiegati anche per le funzioni di controllo; sono sistemi dotati di molti punti di ingresso/uscita e sono dotati di un software proprietario che ne consente una semplice programmazione anche da parte di personale non altamente specializzato. I PMC invece sono computer industriali a struttura modulare: l'hardware è simile a quello di un PLC, tuttavia l'operatore ne ha il pieno controllo e pertanto si tratta di un sistema molto potente dedicato a personale altamente qualificato.

I **PLC** sono quelle apparecchiature di controllo in grado di realizzare tutte le principali funzioni logiche richieste per la conduzione di una macchina o di un processo operativo secondo un determinato programma, memorizzato in opportuni circuiti dell'apparecchiatura stessa (memorie). Un PLC, quindi, è un sistema logico programmabile in grado di realizzare un insieme ordinato di operazioni, definite da comandi facilmente modificabili, strutturate in modo ciclico. I primi PLC sono stati utilizzati all'inizio degli anni '70 nell'industria automobilistica ove si sono posti come valida alternativa ai controllori a relè all'epoca assai diffusi. Prima della loro introduzione, per gestire automaticamente impianti di produzione o macchine operatrici, era infatti necessario progettare circuiti dedicati a logica cablata basati sull'impiego di relais che, come si è detto, possono anche essere utilizzati per la realizzazione di funzioni logiche. Le logiche a relais sono di semplice realizzazione e alla portata di personale non altamente specializzato, tuttavia sono ingombranti, lente e caratterizzate da elevati consumi di potenza che, tra l'altro, inquinano elettromagneticamente l'ambiente.

La presenza dei PLC come soluzione ai problemi di automazione, controllo e monitoraggio nelle applicazioni industriali, è una realtà ormai matura e presente da molti anni. Solo negli ultimi anni è però diventata così diffusa quanto oggi, tanto che il controllo industriale è oggi ormai quasi sempre affidato a questi dispositivi.

Fino agli anni 80, infatti, i PLC offerti dalle grandi case, avevano ancora grossi limiti, soprattutto in termini di affidabilità e di costo: non esistevano quei dispositivi compatti che oggi sono presenti in tutti i listini del mercato e che rappresentano per una larga fetta delle applicazioni poco complesse un ottimo compromesso tra prestazioni ed investimento essendo particolarmente semplici ed economici. Al contrario, l'offerta era limitata a dispositivi dai costi ben più alti delle poche centinaia di migliaia di lire richieste oggi, e dalle prestazioni nettamente inferiori, dove con prestazioni si intende il grado di affidabilità e la velocità di scansione degli ingressi, che spesso non giustificavano l'investimento richiesto. Per quanto riguarda l'affidabilità, i controllori non davano garanzie sulla durata e sulla correttezza di funzionamento, che dovevano invece essere utilizzati spesso su applicazioni critiche, che richiedevano un grado di affidabilità ben più alto. I limiti di velocità di scansione degli ingressi (circa 100 ms), pesavano invece in applicazioni di controllo in tempo reale, per le quali questi tempi erano inaccettabili. Per questi motivi la scelta per l'automazione delle macchine ricadeva spesso su offerte alternative, in particolare molte piccole aziende vendevano soluzioni "ad hoc", ossia schede a microprocessore costituite da hardware semplice e quindi affidabile a elevate prestazioni, ma la cui programmazione richiedeva personale altamente qualificato. Nei primi anni novanta, le grandi case costruttrici sono scese in campo con PLC che superavano brillantemente i problemi descritti in precedenza, incrementando l'affidabilità e diminuendo i tempi di scansione degli I/O, con costi contenuti. Inoltre nella scelta di un PLC pesa moltissimo il supporto in termini di punti vendita e assistenza, di disponibilità di ricambi, di tempi di garanzia e di possibilità di istruzione del personale, caratteristiche di grandi società multinazionali.

Il primo linguaggio usato in automazione è stato lo schema a relè; tale schema, sul quale erano rappresentati tutti i contatti elettrici, permetteva, nelle realizzazioni a logica cablata, non soltanto di comprenderne il funzionamento, ma anche di procedere al cablaggio l'apparecchiatura. Successivamente sono stati sviluppati linguaggi più evoluti che consentono, oltre che di semplificarne la progettazione, di migliorare la comprensione del funzionamento di un automatismo e di facilitare la manutenzione dello stesso.

In conclusione i PLC sono stati utilizzati in sostituzione delle logiche a relais grazie ai seguenti vantaggi:

- Riduzione dei cablaggi
- Elevata versatilità verso "upgrade"
- Riduzione degli ingombri
- Riduzione della potenza (assorbimento  $\approx 100\text{mA}$  nei PLC più compatti)
- Aumento della velocità di elaborazione
- Semplice, robusto ed affidabile
- Consente nuovi campi d'impiego (regolazione, controllo, calcolo multivariabile,..)

L'architettura dei PLC è in genere modulare, nel senso che il numero di punti di ingresso/uscita varia a seconda della configurazione dell'hardware e può essere aumentato salvaguardando l'investimento iniziale. Si hanno quindi moduli di elaborazione (CPU), moduli di ingresso e uscita logico e analogico, moduli dedicati ad un particolare sensore (Es. termocoppia),... Per la realizzazione di compiti complessi

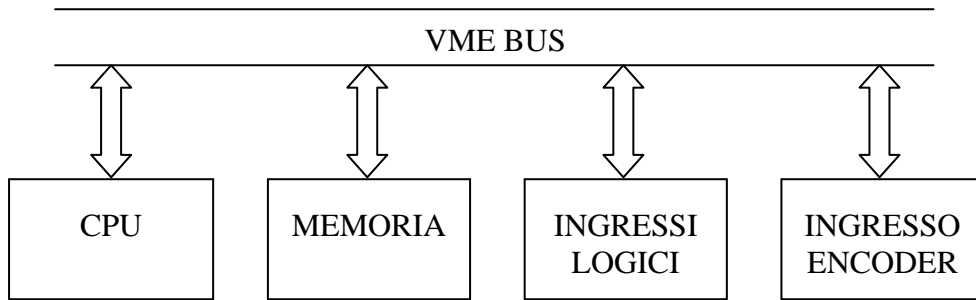
(es. controllo assi), il PLC mette a disposizione dei moduli funzionali, ossia dei sistemi che comprendono hardware e software che l'utente si limita a configurare.



Del PLC si parlerà approfonditamente nel capitolo III.

I **PMC** sono dei computer a struttura modulare che operano in tempo reale e che vengono utilizzati per lo svolgimento di compiti complessi in termini di tempo critico e grandi volumi di dati. Tali sistemi si rendono necessari in quanto i PLC non sono in grado di trattare grandi volumi di dati e, data la presenza di linguaggi di programmazione poco efficienti perché orientati ad operatori non specializzati, non sono in grado di svolgere compiti particolarmente critici in quanto a tempistiche. Nei PLC tali compiti vengono delegati ai moduli funzionali che, come si è detto, non sono programmabili da utente ma configurabili, per cui, se una certa funzione o algoritmo non è stato previsto dal costruttore, in nessun modo l'utente può realizzarla pur disponendo dell'hardware necessario. Si rendono quindi necessari dei sistemi programmabili a basso livello, ovviamente da personale altamente qualificato, così da ottenere i massimi risultati che quell'hardware può dare. Con l'affermarsi di sistemi operativi in tempo reale per ambiente PC e la possibilità di modulare le esigenze in termini di ingressi/uscite con le architetture decentralizzate connesse mediante reti di comunicazione potenti e veloci, si pensa che in un prossimo futuro i PMC verranno sostituiti dalle architetture basate su PC.

I PMC devono quindi essere modulari, facilmente riconfigurabili e riprogrammabili, dotati di un semplice sistema operativo real-time multitasking, veloci, altamente interfacciabili sia verso altri computer che verso sistemi comunicanti in modo numerico, logico o analogico e scarsamente standardizzati (macchine utensili, robot, sensori,...), robusti e cioè installabili in prossimità del processo o della macchina. Esistono prodotti orientati a differenti fasce di costo/prestazioni: dal sistema economico, basato su bus monomaster (1 sola scheda CPU), compatto, modulare con una vasta gamma di moduli (Esempio: 100 moduli differenti) con pochi punti di I/O per modulo (Esempio: schede da 8 ingressi logici), al sistema più versatile e aperto, basato su bus standard multimaster (Esempio: VME BUS), modulare con una gamma limitata di moduli, prevalentemente intelligenti, ad elevate prestazioni (potente struttura di calcolo multi-CPU).



Nel primo caso, dato il limitato potere di calcolo e la vasta gamma di moduli, il prodotto è rivolto verso applicazioni orientate all'I/O (Input/Output), generalmente definite mediante semplici e brevi programmi scritti in linguaggio ad alto livello (Basic, C,..); se l'applicazione viene considerata a bassissimo livello di modificabilità (Esempio: controllo di più motori coordinati), il software applicativo, scritto in linguaggio C per avere il totale controllo del processore senza sistema operativo, può essere direttamente memorizzato su memoria EPROM, riducendo i costi grazie all'eliminazione di memoria RAM e memoria di massa e relativi controller. Nel secondo caso, dati i costi superiori, il prodotto viene utilizzato per applicazioni complesse in termini di elaborazione, prestazioni e interfacciamento in tempo reale; il software è articolato e frutto di operatori altamente qualificati; viene scritto in linguaggi ad alto livello, tipicamente C. Oltre a linguaggi di estrazione informatica, come il C, i PMC supportano in genere anche linguaggi grafici orientati alla formazione culturale del tecnologo, ossia dell'esperto del processo tecnologico in questione.

Il principale limite delle applicazioni basate su PMC è il costo di sviluppo del software, data la mancanza di sistemi operativi e ambienti software di supporto: il software deve quindi essere progettato sulla base di conoscenze e/o programmi, e/o librerie che sono frutto del patrimonio aziendale, inoltre il software deve essere sviluppato e soprattutto testato anche a seguito di modifiche.

Tra i principali tipi di moduli di un microcomputer industriale vi sono CPU (moduli intelligenti), moduli di memoria (RAM, EPROM, EEPROM, memorie di massa), moduli periferici e di I/O.

Tra i moduli CPU distinguiamo:

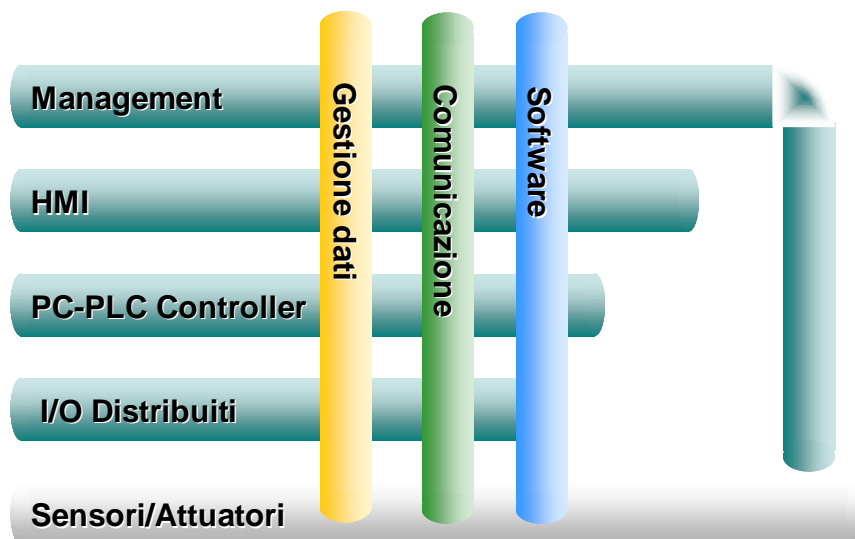
- CPU General Purpose ad alte prestazioni  
(con  $\mu P$  potenti e configurabili come Master o Slave)
- CPU General Purpose "compatte"  
(con  $\mu P$  a 8-16bit, generalmente Slave, dedicate ad applicazioni)
- CPU General Purpose orientate all'I/O (-Esempio: Schede PLC-)
- CPU Grafiche  
(Utilizzate per la gestione di monitor ad alta risoluzione e tastiere -Es.: Schede PC-)
- CPU di interfacciamento  
(CPU dedicate alle comunicazioni verso altri computer; spesso dotate di firmware per il protocollo di interfacciamento)
- CPU di controllo periferiche (Esempio: controllore di memorie di massa)
- Moduli coprocessori numerici  
(in disuso, data la potenza dei nuovi microprocessori)



Tra i moduli periferici e di I/O distinguiamo:

- Moduli di ingresso/uscita logici (isolati e non isolati)
- Moduli di ingresso/uscita analogici (in tensione, in corrente, differenziali, sbilanciati,...)
- Moduli di conteggio (Esempio: interfaccia verso encoder come trasduttore di velocità/posizione)
- Moduli di temporizzazione (Esempio: orologio, calendario, allarme)
- Moduli di interfaccia parallela (Esempio: interfaccia Centronics verso stampante)
- Moduli di interfaccia seriale (Esempio: RS232 verso periferiche -terminali, stampanti-, RS485 verso sistemi controllati da un microprocessore -azionamenti- verso trasduttori/sensori (Esempio: termocoppie, resolver,...))

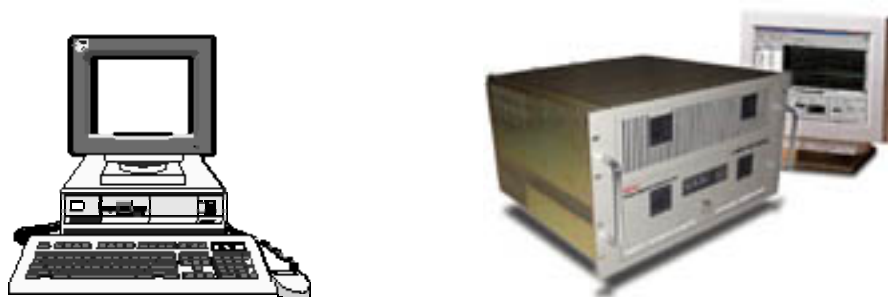
Come si è detto, oggi le architetture basate su bus, come ad esempio il VMEbus, stanno cedendo il passo a architetture basate su PC con I/O distribuito, grazie anche all'affermarsi di concetti di integrazione (vedi capitolo VI).



Il concetto di integrazione implica essenzialmente uniformità nei 3 punti: nella comunicazione, nella gestione dei dati e nella piattaforma SW. Per quanto concerne la comunicazione, il chi comunica con chi è stabilito facilmente mediante tabelle di collegamento o mediante servizi di rete omogenei ed identici per tutte le reti standard utilizzate. A livello di gestione dati, i dati vengono introdotti una volta sola e sono disponibili nel data base per tutta l'impresa e sono condivisibili da tutti. Infine, se tutti i componenti e sistemi sono progettati, configurati, programmati, messi in servizio, testati e controllati con un unico SW modulare sotto una unica piattaforma operativa unitaria è possibile la portabilità delle applicazioni con notevole risparmio nella gestione del software.

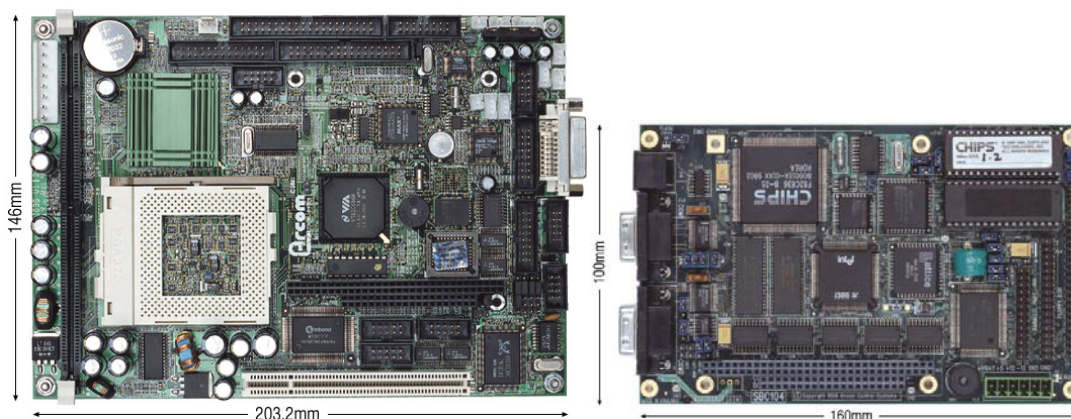
I **computer industriali** rivestono un ruolo di primaria importanza sia a livello di area (workstation, potenti elaboratori,...) sia a livello di cella (PC industriali o computer modulari per la realizzazione di sistemi di supervisione, controllo di processo, interfaccia operatore,...). Dotati di elevato potere di calcolo, si interfacciano facilmente ad altri computer con i quali possono condividere dati e programmi, consentono la

gestione diretta di segnali anche non numerici, sono dotati di software di base che semplifica la programmazione e la gestione da parte dell'utente. Con i computer industriali è possibile sfruttare i vantaggi offerti dai sistemi aperti (elevato indice di standardizzazione, tutela degli investimenti,...) e nello stesso tempo disporre di uno strumento costruttivamente adatto ad operare in ambiente industriale e ad elevata affidabilità. Così, ad esempio, un PC industriale, a parità di prestazioni con un PC da ufficio, costa quasi il doppio a causa delle differenti caratteristiche costruttive (tastiera a membrana, alimentatore più "filtrato" rispetto alla rete, contenitori di forma adatta al montaggio in quadro elettrico e di materiale metallico per una corretta messa a terra e quindi protezione contro i disturbi elettromagnetici,...).



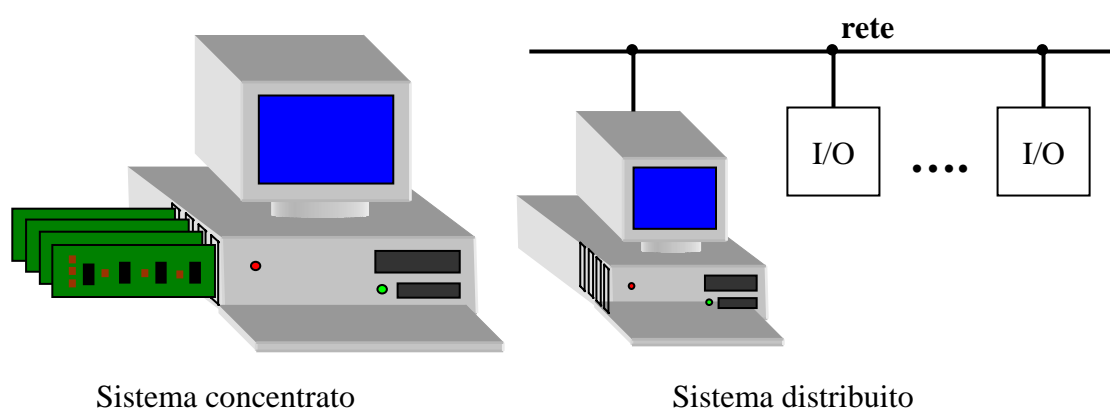
Visto che i volumi di vendita dei PC industriali sono decisamente più ridotti rispetto alla versione “Office”, i PC industriali sono più costosi e più lenti nell’evoluzione. Date le migliori caratteristiche costruttive (compatibilità elettromagnetica) dei PC Office odierni, è sempre più consueto trovarli anche ai livelli più a contatto con il campo.

Esistono tuttavia PC industriali embedded, ossia schede PC di dimensioni molto compatte che permettono lo sviluppo di applicazioni in ambiente PC. Esistono modelli a basso costo, come ad esempio quello in figura a destra (SBC104 by Arcom) in formato standard singola Europa (Eurocard 100mmx160mm): basata sul processore 386SX a 25MHz, dispone di 4Mbytes DRAM, 2Mbytes of Flash fornita con già una versione “rommata” di DOS (ROMDOS), 2 porte seriali, un’interfaccia parallela per stampante e una verso tastiera e mouse. L’elevata affidabilità (MTBF=140000h), le dimensioni compatte, il costo contenuto (<1000€) e la programmabilità in C sotto ambiente DOS (ma supporta anche sistemi operativi più moderni, come embedded Linux, o in tempo reale, come QNX) ne fanno un componente molto utilizzato. Le schede tipo PC104 vengono costruite dalla fine degli anni 80 e si sono talmente diffuse in ambiente industriale che l’IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineering) ha definito uno standard per questi tipi di schede (IEEE-P996 standard for Compact Embedded PC Modules) così da uniformare e regolamentare il prodotto di diversi costruttori. Lo standard definisce anche il connettore per i moduli aggiuntivi (16-bit PC/104 IEEE-P996 interface) e le relative caratteristiche elettriche. In fatti tali schede possono essere utilizzate in due modi: singolarmente e interfacciata verso altri sistemi. In quest’ultimo caso viene in genere costruita una struttura di supporto in grado di ospitare la scheda PC104 e i suoi moduli di espansione.



Vi sono poi le schede PC104 a più elevate prestazioni, come il modello Olympus by Arcom, raffigurato a sinistra. Supporta diversi processori, dal Celeron 433MHz fino a 1GHz e fino al Pentium III con 133MHz di FSB (Front Side Bus, ossia frequenza di lavoro esterna), compreso un acceleratore grafico per applicazioni 3D (S3@ Savage4™), comprende interfacce di rete Ethernet (10baseT e 100baseT), interfacce USB, connettori verso memorie di massa e uno slot di interfaccia PCI (Peripheral Component Interface). Contrariamente alla versione low-cost, non supporta sistemi operativi residenti, ma la versione del BIOS Award BIOS (Millennium compliant).

Il PC, sia in versione scheda che in versione rack o in versione office, è lo strumento ideale per svolgere le funzioni di interfaccia operatore, memorizzazione dei dati, interfaccia verso i computer a più alto livello, purchè arricchito con schede di Ingresso/Uscita; tuttavia la maggior parte delle applicazioni di automazione richiede un numero di punti di ingresso uscita largamente superiore rispetto alle potenzialità di un PC. Infatti un PC dispone di pochi slot PCI (3-5) e quindi è in grado di supportare poche schede di ingresso e uscita logiche e analogiche. Come si vedrà meglio nel capitolo IV a proposito dei sistemi di acquisizione, le scarse caratteristiche di interfacciamento verso il campo dei PC possono essere superate grazie alle architetture a I/O distribuito.



Oltre al limite sulla gestione degli ingressi e delle uscite, il PC può risultare inadeguato per le funzioni di controllo in tempo reale a causa della presenza di sistemi operativi non in tempo reale (Windows, Linux). Ovviamente esistono sistemi operativi in tempo reale per piattaforme PC (Es. QNX) tuttavia il principale vantaggio nell'uso di una piattaforma PC consiste nella diffusione delle conoscenze e delle competenze.

Quindi il sistema operativo in tempo reale deve essere in grado di supportare i principali e più utilizzati ambienti di sviluppo software, cosa non difficile per sistemi operativi diffusi (Windows, Linux, MacOS, Solaris per SUN), ma decisamente più complessa per i sistemi operativi in grado di operare in tempo reale stretto, quindi deterministici e con un tempo massimo di ritardo inferiore al ms.

Sebbene si vada sempre più affermando la tendenza a realizzare interfacce operatore su piattaforma PC, sono ancora molto diffusi e utilizzati anche su nuovi impianti i **pannelli di visualizzazione**. In realtà si tratta di sistemi che integrano semplici PLC e PC per lo svolgimento delle operazioni direttamente a contatto con l'operatore (comandi e segnalazioni) e che quindi ne assorbono anche gli ambienti di sviluppo del software. Convivono quindi i sistemi di sviluppo per i PLC (schemi a contatti) e per i microcomputer dedicati (linguaggi pseudografici, software per la creazione e gestione di database, per la gestione di allarmi e segnalazioni e così via). Fondamentale caratteristica è la possibilità di comunicare secondo protocolli standard.



Una particolare attenzione meritano i sistemi di visione, che vengono oggi utilizzati per controlli dimensionali e di qualità, identificazione e conteggio pezzi, riconoscimento di caratteri. In realtà non si tratta solo di una potente videocamera ad elevata risoluzione, ma di un sistema computerizzato dotato di software specializzato nella gestione di immagini. L'ambiente di configurazione e i programmi applicativi vengono sviluppati su PC, ad esempio in linguaggio C++, sotto i più noti sistemi operativi, quindi il programma compilato viene scaricato nel sistema di visione per essere eseguito in tempo reale. Mentre il sistema di visione lavora, può scambiare informazioni relative all'immagine e parametri di configurazione mediante interfaccia di rete, che in genere viene scelta sulla base della velocità.

## RIFERIMENTI CAP. 1

W. Bohm, "Azionamenti elettrici" Tecniche nuove

M. Pezzi, "Macchine elettriche" Zanichelli Bologna

C. Celati, "PLC, processi, sistemi, automi" Hoepli

<http://131.114.9.130/dispense/dispense.htm> motori elettrici e convertitori

<http://www.blusoft.it/Ingegneria/Macchine.htm> macchine elettriche.

<http://users.pandora.be/educyclopedia/electronics/sensors.htm> sensori

<http://www.efunda.com/designstandards/sensors/> sensori

<http://www.info.omron.com> sensori, attuatori, sistemi per l'automazione

<http://www.agilent.com> strumentazione e sistemi per l'automazione

<http://www.ni.com> strumentazione e sistemi per l'automazione

<http://www.ite.his.se/ite/research/automation/course/toc.htm> robot

<http://www.ad.siemens.de/simatic> PMC (vedi linea Simatic M7)

PLC (vedi linea Simatic S7)

Controllori basati su PC (v. linea WinAC)

Pannelli operatore (vedi linea Simatic C7)

<http://www.arcomcontrols.com/products/icp/pc104/SBCs.htm> Schede PC (PC104)